Die Bedeutung der Anfahrbeschleunigung bei elektrisch betriebenen Stadtschnellbahnen

Von der

Technischen Hochschule zu Breslau

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs

genehmigte

Dissertation

Vorgelegt von

Dipl.-Ing. Hans Voigtländer

aus Hessen in Braunschweig

Referent: Prof. Dr.-Ing. K. Euler

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Gg. Hilpert

Tag der mündlichen Prüfung: 30. Juni 1928

Verlagsbuchhandlung Julius Springer in Berlin · 1928

Die Dissertation erscheint ungekürzt in den „Wissenschaftlichen Veröffentlichungen aus dem Siemens-Konzern“ VII, 1. Das vorliegende Exemplar ist ein Sonderdruck dieses Aufsatzes.

Ein Auszug unter dem Titel „Der Einfluß der Stundendrehzahl eines Motors auf Räumungszeit und Fahrzeit bei Stadtschnellbahnen“ erscheint im Zentralblatt für den elektrischen Zugbetrieb, September 1928.

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Inhaltsübersicht.

I. Einleitung und Stellung der Aufgaben.
II. Theoretische Grundlagen.
a) Grundlegende Formeln.
b) Einführung der Prozentcharakteristik.
c) Aufstellung der Formeln mit Prozentwerten sowie der Umrechnungsformeln.
d) Wattstundenverbrauch.
e) Motorbeanspruchung.
f) Räumungszeit.
g) Zeitrückhalt.
III. Durchführung der Berechnungen.
IV. Anwendung der gefundenen Ergebnisse.
Verzeichnis der wichtigsten Bezeichnungen.
V. Zusammenfassung.
Benutzte Literatur.

I. Einleitung und Stellung der Aufgaben.

Die Bedingungen, die von modernen Stadtschnellbahnen mit verhältnismäßig kurzen Haltestellenentfernungen und kurzen Haltezeiten erfüllt werden müssen, sind möglichst kurze Fahrzeit und dichte Zugfolge. Es ist nun eine bekannte Tatsache[1]), daß große Anfahrbeschleunigung (und ebenfalls große Bremsverzögerung) einen günstigen Einfluß auf die Erfüllung dieser Bedingungen nehmen können. Hauptaufgabe dieser Arbeit soll es aber sein, festzustellen, daß dieser günstige Einfluß gewisse Grenzen haben, ja sich sogar ins Gegenteil umkehren kann.

Unter Anfahrbeschleunigung versteht man im Bahnbetrieb die als konstant angenommene mittlere Beschleunigung während der Anfahrperiode, in der die Motoren (Gleichstrom vorausgesetzt!) infolge Vorschaltung von Anfahrwiderständen also noch nicht mit ihrer vollen Nennspannung arbeiten. Zur Verminderung der Verluste in diesen Widerständen wird allgemein die sog. Reihen-Parallelschaltung der Fahrmotoren angewendet, bei der die Anfahrperiode aus zwei Abschnitten, der Reihenschaltung und der Parallelschaltung je zweier Fahrmotoren, besteht; schaltungstechnisch wird sie als bekannt vorausgesetzt. Es entspricht nun jeder mittleren Anfahrbeschleunigung auch ein mittlerer Strom je Motor, so daß man mit Rücksicht auf die Gruppierung je zweier Motoren bei der Anfahrt (Reihen-Parallelschaltung) folgende zwei Fälle unterscheiden kann:

[1]) Siehe benutzte Literatur (am Schluß der Arbeit) z. B. unter Nr. 1, 2, 7, 8, u. a. O.

1. Der Anfahrstrom je Motor ist bei Parallelschaltung zweier Fahrmotoren (im folgenden kurz „auf Parallel" genannt) genau so groß wie bei Reihenschaltung (im folgenden kurz „auf Reihe" genannt).

2. Der Anfahrstrom je Motor ist auf Parallel von dem Anfahrstrom je Motor auf Reihe verschieden.

Der erste Fall war bisher allgemein üblich; er ergibt auf Reihe und Parallel eine gleich große, konstante (mittlere) Anfahrbeschleunigung, so daß die Geschwindigkeit v des Fahrzeuges in Abhängigkeit von der Zeit t während der Anfahrperiode geradlinig ansteigt. Dieses geradlinigen Anstieges der Geschwindigkeit wegen soll eine solche Anfahrt „geradlinige Anfahrt" genannt werden (Bild 1). Betrachtet man je zwei bei der Anfahrt in Reihen-Parallelschaltung arbeitende Motoren als eine „Einheit", so wird der Anfahrstrom für eine solche Einheit J_E durch eine aufsteigende Treppenlinie gekennzeichnet, die auf Parallel den doppelten Reihenwert hat (vgl. Bild 1). Der Anfahrstrom je Motor J_M dagegen ist auf Reihe und Parallel nach Voraussetzung gleich groß.

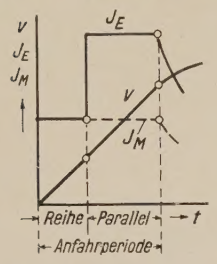

Bild 1. Veranschaulichung der geradlinigen Anfahrt.

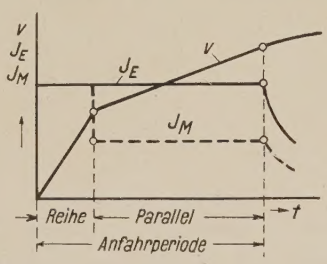

Bild 2. Veranschaulichung der gebrochenen Anfahrt.

Der zweite Fall gestattet theoretisch zahlreiche Varianten, es soll jedoch hier nur die anläßlich der Elektrisierung der Berliner Stadt- und Ringbahn gewählte Anfahrart untersucht werden, bei der der Anfahrstrom je Motor J_M auf Parallel den halben Reihenwert hat (vgl. Bild 2). Das hat zur Folge, daß die Beschleunigung je auf Reihe und Parallel wieder konstant, jedoch auf Parallel erheblich kleiner ist als auf Reihe; es steigt daher die Geschwindigkeit v in Abhängigkeit von der Zeit t je auf Reihe und Parallel wieder geradlinig an, die Steigung dieser beiden Geraden ist aber verschieden. Des gebrochenen Linienzuges für die Geschwindigkeit wegen soll diese Anfahrart „gebrochene Anfahrt" genannt werden. Der Strom je Einheit J_E ist bei ihr während der ganzen Anfahrperiode konstant, der Strom je Motor J_M dagegen durch eine absteigende Treppenlinie gegeben (vgl. Bild 2).

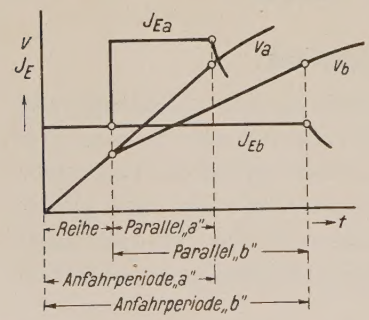

Bild 3. Schematischer Vergleich der geradlinigen und gebrochenen Anfahrt für gleich großen Motorstrom J_M auf Reihe.
Index a: geradlinige Anfahrt;
„ b: gebrochene „ .

Aus dem Gesagten kann man folgendes schließen:

1. Hält man bei beiden Anfahrarten den Anfahrstrom je Motor J_M auf Reihe konstant, so wird die geradlinige Anfahrt infolge größerer mittlerer Beschleunigung während der ganzen Anfahrperiode in kürzerer Zeit beendet sein als die gebrochene Anfahrt, sie hat aber auf Parallel den doppelten Anfahrstrom je Einheit J_E gegenüber der gebrochenen Anfahrt. (Vgl. Bild 3, in der Index a die geradlinige Anfahrt, Index b die gebrochene kennzeichnet.)

2. Hält man bei beiden Anfahrarten den Anfahrstrom je Einheit J_E auf Parallel konstant, so ist die geradlinige Anfahrt infolge kleinerer mittlerer Beschleunigung

während der ganzen Anfahrperiode zu späterer Zeit als die gebrochene Anfahrt beendet, sie hat aber auf Reihe nur den halben Anfahrstrom je Einheit J_E gegenüber der gebrochenen Anfahrt (vgl. Bild 4).

3. Zwischen diesen beiden Fällen liegt der mit gleicher mittlerer Anfahrbeschleunigung für beide Anfahrarten, für den jedoch die geradlinige Anfahrt größeren Anfahrstrom J_E auf Parallel zur Folge haben wird.

Der Anfahrstrom je Einheit J_E auf Parallel ist nun ein Maß für den Maximalstrom eines Triebwagens bzw. eines Triebwagenzuges während der ganzen Anfahrt; dieser Maximalstrom interessiert im Bahnbetrieb, da er für die Bemessung der Schaltapparate in Fahrzeug und Unterwerk sowie der Umformer im Unterwerk eine gewisse Bedeutung hat. Es würde z. B. unter sonst gleichen Verhältnissen und bei gleichem Anfahrstrom je Motor J_M auf Reihe erst bei gleichzeitigem Anfahren zweier Züge und bei Verwendung gebrochener Anfahrt der gleiche Maximalstrom auftreten wie bei geradliniger Anfahrt nur eines Zuges.

Es wäre jedoch verfehlt, wenn man die Wahl der günstigsten Anfahrart schon aus solchen Gesichtspunkten treffen würde; es muß vielmehr erst untersucht werden, welchen Einfluß die gebrochene Anfahrt auf ein ganzes Fahrdiagramm zu nehmen imstande ist. Das festzustellen, ist eine weitere Aufgabe dieser Arbeit.

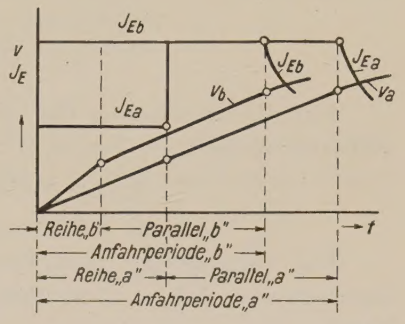

Bild 4. Schematischer Vergleich der geradlinigen und gebrochenen Anfahrt für gleich großen Anfahrstrom je Einheit J_E auf Parallel.
Index a: geradlinige Anfahrt;
„ b: gebrochene „ .

Ferner sei vorweggenommen, daß die ganzen Untersuchungen nicht mit einem bestimmten Motor für eine bestimmte Bahnanlage durchgeführt, sondern durch Verwendung ideeller Werte in gewissen Grenzen allgemeingültig gemacht werden. Die Brauchbarkeit eines solchen Verfahrens sowie die Erleichterung der Übersicht zu erweisen, ist ebenfalls Aufgabe der vorliegenden Arbeit.

II. Theoretische Grundlagen.

a) Grundlegende Formeln.

Bei der Berechnung von Fahrdiagrammen geht man meist so vor, daß man das Fahrdiagramm in geeignet kleine Abschnitte unterteilt und für diese die interessierenden Werte berechnet. Je feiner die Unterteilung ist, desto genauer wird auch die Rechnung.

Steigt die Geschwindigkeit von v_1 auf v_2 an, so ergibt sich die dazu erforderliche Zeit Δt bei einer mittleren Beschleunigung p zu:

$$\Delta t_{sk} = \frac{v_2 - v_1}{p} = \frac{\Delta v}{p}. \tag{1}$$

Der während dieser Zeit zurückgelegte Weg ist:

$$\Delta s_m = \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot \Delta t. \tag{2}$$

Ebenso erhält man die in dem Zeitabschnitt Δt verbrauchten Amp.-sk bzw. die für die Erwärmung des Motors maßgebenden Amp.²-sk[1]) allgemein zu:

$$\Delta(J \cdot t)_{\text{Amp.-sk}} = \frac{J_1 + J_2}{2} \cdot \Delta t\,, \tag{3}$$

$$\Delta(J^2 t)_{\text{Amp.}^2\text{-sk}} = \frac{J_1^2 + J_2^2}{2} \cdot \Delta t\,. \tag{4}$$

Dabei bedeuten J_1 bzw. J_2 die der Geschwindigkeit v_1 bzw. v_2 zugeordneten Ströme.

Die Amp.-sk berechnet man zweckmäßigerweise für die „Einheit", d. h. für zwei bei der Anfahrt in Reihen-Parallelschaltung arbeitende Motoren; in Formel (3) ist daher der Strom J_E einzusetzen, so daß man erhält:

$$\Delta(J \cdot t) = \frac{J_{E_1} + J_{E_2}}{2} \cdot \Delta t \quad \text{Amp.-sk je Einheit.} \tag{3a}$$

Für die Berechnung der Amp.²-sk ist dagegen nur der Strom je Motor J_M einzusetzen; daher:

$$\Delta(J^2 t) = \frac{J_{M_1}^2 + J_{M_2}^2}{2} \cdot \Delta t \quad \text{Amp.}^2\text{-sk je Motor.} \tag{4a}$$

Die Summierung aller Einzelwerte $\Delta \ldots$ während einer Fahrt ergibt dann die Gesamtwerte $\Sigma\Delta \ldots$ für Zeit, Weg, Amp.-sk und Amp.²-sk für die betreffende Fahrt.

Bezeichnet man die Zahl der in einem Triebwagenzuge vorhandenen Fahrmotoren mit a, die Zugkraft je Motor in kg mit Z, den Fahrwiderstand des Zuges in kg mit W und die Masse des Zuges in kg: m/sk² mit M, so ergibt sich die Beschleunigung p allgemein zu:

$$p = \frac{a \cdot Z - W}{M}\,. \tag{5}$$

Die Zugkraft pro Motor erhält man aus folgender Formel:

$$Z_{kg} = \frac{2 \cdot \eta_z \cdot \ddot{u} \cdot Md}{D} = K \cdot Md\,, \tag{6}$$

worin η_z den Wirkungsgrad des Zahnradgetriebes, $\ddot{u}$ das Verhältnis von Motordrehzahl zu Triebraddrehzahl (Übersetzungsverhältnis), Md das Drehmoment je Motor in mkg und D den Triebraddurchmesser in m bedeuten[2]). Der Faktor K, der das Übersetzungsverhältnis, den Getriebewirkungsgrad und den Raddurchmesser enthält, soll mit „Zugkraftkonstante" bezeichnet werden.

Die Geschwindigkeit v in m/sk ergibt sich aus der Motordrehzahl n pro Minute zu:

$$v \text{ m/sk} = \frac{D \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot \ddot{u}} = k \cdot n. \tag{7}$$

Die Konstante k soll sinngemäß „Geschwindigkeitskonstante" genannt werden.

Wählt man für den Getriebewirkungsgrad η_z einen der Praxis entsprechenden Wert zwischen 0,95 und 0,96, so erhält man als Produkt der genannten beiden Kon-

[1]) Vgl. Abschnitt e) auf Seite 179/180.

[2]) Auf die Beziehungen zwischen Motorabmessungen (Zentrale), möglichem Übersetzungsverhältnis und Triebraddurchmesser (Abstand von Schienenoberkante!) soll hier nicht eingegangen werden.

stanten den Wert 0,1; durch diese Tatsache werden Überschlagsrechnungen sehr erleichtert.

Die Berechnungen sollen nun dadurch vereinfacht werden, daß man in Formel (5) nur die Zugkraft eines Motors und dementsprechend für W und M auch nur die auf einen Motor entfallenden Werte einsetzt. Bei einem bestimmten Zuggewicht pro Motor G_M in t ergibt sich dann der Fahrwiderstand pro Motor zu $G_M \cdot w$, wo w den Fahrwiderstand in kg/t bezeichnet. Bei der Ermittlung der Zugmasse pro Motor M_M sind auch die rotierenden Massen zu berücksichtigen; geschieht das durch einen Zuschlag von z. B. 7 % zum Leergewicht des Zuges, für das 80 % des Gewichtes des vollbesetzten Zuges angenommen werden sollen, so erhält man:

$$M_M = (0{,}8 \cdot 1{,}07 + 0{,}2)\frac{1000}{9{,}81} \cdot G_M = 107{,}65 \cdot G_M . \tag{8}$$

Es ergibt sich somit für die Beschleunigung p der Ausdruck:

$$p = \frac{K \cdot Md - G_M \cdot w}{107{,}65 \cdot G_M} = \frac{K \cdot Md}{\varrho \cdot G_M} - \frac{w}{\varrho}, \tag{9}$$

wo ϱ den „Massenfaktor" darstellt und gleich dem in Gleichung (8) gefundenen Wert 107,65 ist. Die Gleichung (9) stellt in Abhängigkeit vom Drehmoment eine Gerade dar mit dem Ordinatenabschnitt $-\frac{w}{\varrho}$ und dem Nullpunkt bei $Md = \frac{w \cdot G_M}{K}$.

b) Einführung der Prozentcharakteristik.

Um die nachfolgenden Untersuchungen, wie in der Einleitung erwähnt, übersichtlicher und innerhalb weiterer Grenzen gültig zu machen, als es bei Annahme eines bestimmten Motors möglich wäre, sollen nicht die tatsächlichen Werte für Strom, Drehzahl, Drehmoment, Zugkraft, Geschwindigkeit, Weg, Zeit usw. verwendet werden, sondern ideelle Werte, sog. „Prozentwerte".

Zu diesem Zweck sind für eine Anzahl von Gleichstrom-Bahnmotoren der Siemens-Schuckert-Werke (etwa von der Leistung, wie sie bei Stadtschnellbahnen in Frage kommt) die jeweiligen Werte der Kennlinien für Strom, Drehzahl und Drehmoment durch die entsprechenden Werte bei der Stundenleistung dividiert. (Man erhält somit für die Stundenleistungswerte die Größe 1; bei kleinerem Strom ist dann das Drehmoment ebenfalls kleiner als 1, die Drehzahl dagegen größer als 1.) In Bild 5 sind fünf der auf diese Weise gefundenen „Prozentcharakteristiken" dargestellt, wobei vier Motoren der Übersichtlichkeit wegen nur durch verschiedenartige Punkte gekennzeichnet wurden. Man erkennt, daß innerhalb gewisser Bereiche die verschiedenen Charakteristiken ziemlich oder sogar vollkommen übereinstimmen. Ferner ist für die betreffenden Motoren noch das Verhältnis von Prozentdrehmoment zu Prozentstrom ausgerechnet und für drei Motoren aufgezeichnet; diese Kurven sind ein Maß für den wirksamen Kraftfluß. Es hat nun bei gleichen Prozentströmen der Motor mit prozentual höherem Fluß auch höheres Prozentdrehmoment, dagegen kleinere Prozentdrehzahl; daraus kann man (ohne hier weitere theoretische Erwägungen über die magnetischen und elektrischen Eigenschaften der Gleichstrom-Reihenschlußmaschine anzufügen) schließen, daß die Prozentcharakteristiken zweier Motoren um so besser übereinstimmen werden, je mehr sich ihre prozentualen Flußkurven decken. Da man annehmen kann, daß es dem Berechner und Konstrukteur elektrischer Maschinen möglich sein wird, für eine Anzahl von Motoren gleiche Prozentcharakteristi-

ken zu erreichen, so sind dann auch die nachfolgenden Betrachtungen für alle diese Motoren anwendbar.

Die in Bild 5 ausgezogen dargestellte Prozentcharakteristik ist den Berechnungen dieser Arbeit zugrunde gelegt und daher in Bild 6, ergänzt durch die Charakteristiken bei 70 % und 50 % Erregung und durch die Drehzahlkurven bei halber Nenn-

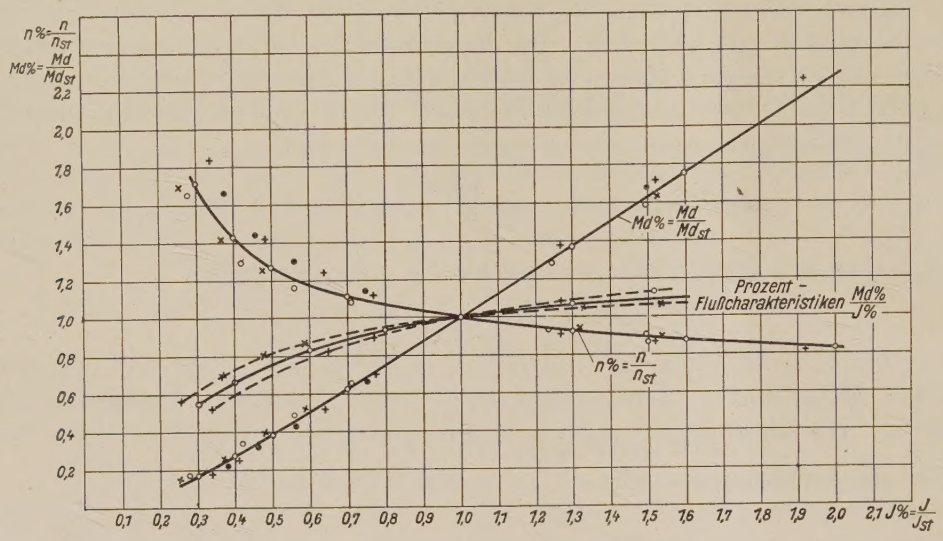

Bild 5. Prozentcharakteristiken von fünf verschiedenen Gleichstrombahnmotoren (mit Eigenlüftung).

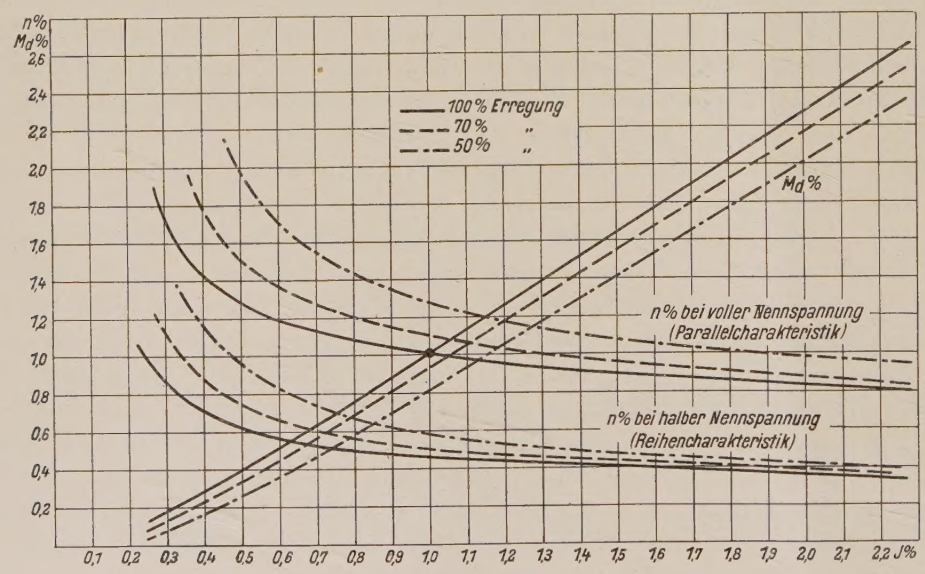

Bild 6. Prozentcharakteristik, wie sie den Berechnungen zugrunde gelegt ist.

spannung, nochmals aufgezeichnet. Die Drehzahlkurven bei halber Nennspannung kennzeichnen die reine Reihenschaltung zweier Motoren bei der Anfahrt (also ohne vorgeschaltete Anfahrwiderstände) und sollen daher mit „Reihencharakteristik" bezeichnet werden, während die Drehzahlkurven für volle Nennspannung dementsprechend „Parallelcharakteristik" heißen sollen, eine Unterscheidung, die beim Drehmoment nicht erforderlich ist. Ohne jeglichen Zusatz ist stets die betreffende

Charakteristik bei vollem Feld gemeint, also ohne Feldschwächung; letztere wird, falls sie beabsichtigt ist, besonders genannt. Die Charakteristiken sind, entgegen der üblichen Weise, in Abhängigkeit vom Strom aufgezeichnet, da dieser ja den Vergleichsmaßstab für die beiden Anfahrarten bilden soll.

c) Aufstellung der Formeln mit Prozentwerten sowie der Umrechnungsformeln.

Durch Verwendung von Prozentcharakteristiken erfahren die Formeln (1) bis (4) grundsätzlich keine Änderung. Man kann jedoch für die Prozentgeschwindigkeit gleich die Prozentdrehzahl einsetzen, da beide zahlenmäßig gleich groß sind. Die Motordrehzahl und Geschwindigkeit verknüpfende Geschwindigkeitskonstante k [Gleichung (7)] wird erst bei der Umrechnung in Effektivwerte berücksichtigt.

Etwas anders liegen jedoch die Verhältnisse bei der Formel (9) für die Beschleunigung. Sie lautete

$$p = \frac{K \cdot Md}{\varrho \cdot G_M} - \frac{w}{\varrho}.$$

Setzt man hier Md in Prozentwerten ein und wählt für die Zugkraftkonstante K, den Fahrwiderstand w in kg/t und das Zuggewicht pro Motor G_M in t beliebige, gebräuchliche Werte, so würde man mit $\varrho = 107{,}65$ für die Beschleunigung p negative Werte erhalten. Wenn man z. B. den Fahrwiderstand ganz vernachlässigen will, kann man eine „Prozentbeschleunigung" $p_{\%}$ einführen, die man zweckmäßig dem Zahlenwert des Prozentdrehmomentes $Md_{\%}$ gleichsetzt; die effektive Beschleunigung erhielte man dann durch Multiplikation der Prozentbeschleunigung mit dem Faktor $\frac{K}{\varrho \cdot G_M}$ und dem Stundendrehmoment Md_{st}, da $Md = Md_{\%} \cdot Md_{\mathrm{st}}$ ist. Man könnte dann alle Berechnungen mit der Prozentbeschleunigung $p_{\%}$ durchführen und erst bei der Darstellung der effektiven Werte auch die Umrechnung der Beschleunigungen vornehmen. Die Vernachlässigung des Fahrwiderstandes ist jedoch nur für rohe Annäherungsberechnungen möglich, da er recht erheblichen Einfluß haben kann.

Eine andere Möglichkeit ist die, daß man für das Drehmoment, bei dem die Beschleunigung zu Null wird, also für $(Md)_{p=0} = \frac{w \cdot G_M}{K}$, einen Wert wählt. Je nach Größe des Fahrwiderstandes w (3 bis 5 kg/t) beträgt das entsprechende Prozentdrehmoment z. B. für die Berliner Stadt-Schnellbahnen etwa 0,07—0,1. Aus der allgemeinen Gleichung (9) folgt für $p = 0$:

$$\frac{K \cdot (Md)_{p=0}}{\varrho \cdot G_M} = \frac{K \cdot Md_{\mathrm{st}} (Md_{\%})_{p=0}}{\varrho \cdot G_M} = \frac{w}{\varrho}, \tag{10}$$

$$(Md_{\%})_{p=0} = \frac{w \cdot G_M}{K \cdot Md_{\mathrm{st}}}. \tag{11}$$

Setzt man in die allgemeine Gleichung (9) für $w : \varrho$ den in Gleichung (10) gefundenen Wert ein, so erhält man:

$$p = \frac{K \cdot Md_{\mathrm{st}} \cdot Md_{\%}}{\varrho \cdot G_M} - \frac{K \cdot Md_{\mathrm{st}} \cdot (Md_{\%})_{p=0}}{\varrho \cdot G_M} = \frac{K \cdot Md_{\mathrm{st}}}{\varrho \cdot G_M} [Md_{\%} - (Md_{\%})_{p=0}]. \tag{12}$$

Den Klammerausdruck kann man wieder als „Prozentbeschleunigung“ $p_{\%}$ auffassen und erhält:

$$p_{\%} = Md_{\%} - (Md_{\%})_{p=0}, \tag{13}$$

$$p = \frac{K \cdot Md_{\mathrm{st}}}{\varrho \cdot G_M} \cdot p_{\%} = \psi \cdot p_{\%}. \tag{14}$$

Man bekommt also wieder denselben Umrechnungsfaktor („Beschleunigungsfaktor“) ψ, wie er auch schon gefunden war, als unter Vernachlässigung des Fahrwiderstandes $p_{\%} = Md_{\%}$ gesetzt war. Durch die Wahl eines Wertes von $Md_{\%}$, für den die Beschleunigung gleich Null ist, der also den Einfluß des Fahrwiderstandes berücksichtigt, wird die Berechnung der „Prozentfahrschaulinien“ sehr übersichtlich, da man ja auch von den Werten für die Zugkraftkonstante K und das Zuggewicht pro Motor G_M frei wird und nicht allein nur von den Motordaten.

Schließlich kann auch das Zuggewicht pro Motor G_M in der allgemeinen Formel (9) für die Beschleunigung so gewählt werden, daß bei Einsetzung von Prozentwerten für das Drehmoment die Beschleunigung mit ihren tatsächlichen Werten in m/sk² erhalten wird. Zu diesem Zweck wird statt des tatsächlichen Wertes für $Md:G_M$ in Gleichung (9) ein zahlenmäßig gleich großer Prozentwert $Md_{\%}:G_{M\%}$ eingesetzt, während man für die Zugkraftkonstante K und den Fahrwiderstand w der Praxis entsprechende Werte beibehält. Es ergibt sich dann:

$$\frac{Md}{G_M} = \frac{Md_{\%} \cdot Md_{\mathrm{st}}}{G_M} = \frac{Md_{\%}}{G_{M\%}}, \tag{15}$$

$$G_{M\%} = \frac{G_M}{Md_{\mathrm{st}}}, \tag{16}$$

$$p = \frac{K \cdot Md_{\%}}{\varrho \cdot G_{M\%}} - \frac{w}{\varrho}. \tag{17}$$

Da das erstgenannte Verfahren, Vernachlässigung des Fahrwiderstandes, als zu ungenau ausscheiden soll, bleibt die Wahl zwischen den beiden anderen Verfahren. Man entscheidet sich also entweder für die Annahme eines Wertes für das Prozentmoment, bei dem die Beschleunigung zu Null wird, und hat das allgemeinste Rechnungsverfahren ohne jegliche tatsächliche Größen, muß jedoch mit Werten für die Prozentbeschleunigung arbeiten, die ohne Kenntnis von K, G_M und Md_{st} keinerlei Rückschlüsse auf die tatsächliche Beschleunigung zulassen (im folgenden bezeichnet mit 1. Verfahren), oder man nimmt für $G_{M\%}$, K und w Werte an und bekommt die Prozentbeschleunigung $p_{\%}$ gleich der effektiven Beschleunigung p; das erforderliche Stundendrehmoment bei bekanntem G_M bestimmt man aus Gleichung (16) (2. Verfahren).

Es bedarf jetzt noch der Angabe der Formeln zur Umrechnung der Prozentwerte in tatsächliche Werte sowie der Erklärung einiger weiterer Grundbegriffe.

In den folgenden Formeln kennzeichnet der Index a die Formel als zum 1. Verfahren, der Index b als zum 2. Verfahren gehörig[1]).

[1]) Zur Erleichterung des Verständnisses der folgenden Formeln erinnere man sich, daß eine „Prozentcharakteristik“ die Charakteristik eines Motors mit den Stundenleistungsgrößen „1“ darstellt. Die unter Verwendung von „Prozentwerten“ für Strom ($J_{\%}$), Drehzahl ($n_{\%}$) und Drehmoment ($Md_{\%}$) gefundenen Größen „Prozentzeit“ ($t_{\%}$), „Prozentweg“ ($s_{\%}$) usw. stellen also Zeiten bzw. Wege usw. dar, die man mit einem Motor erhalten würde, dessen Stundenleistungsgrößen gleich 1 sind. Bezüglich der Beschleunigung p bzw. $p_{\%}$ gilt das am Anfang dieses Abschnittes Gesagte.

Der Gleichung (1):

$$\Delta t = \frac{v_2 - v_1}{p} = \frac{\Delta v}{p}$$

entspricht die Gleichung:

$$\Delta t'_{\%} = \frac{\Delta v_{\%}}{p_{\%}} = \frac{\Delta n_{\%}}{p_{\%}} \tag{18a}$$

bzw.:

$$\Delta t_{\%} = \frac{\Delta v_{\%}}{p} = \frac{\Delta n_{\%}}{p}. \tag{18b}$$

Da $v = k \cdot n = k \cdot n_{st} \cdot n_{\%}$ (n_{st} = Stundendrehzahl) und $p : p_{\%} = \psi$ ist, erhält man:

$$\Delta t = \frac{\Delta n_{\%}}{p_{\%}} \frac{k \cdot n_{st}}{\psi} = \Delta t'_{\%} \cdot \frac{k \cdot n_{st} \cdot \varrho \cdot G_M}{K \cdot M d_{st}} \quad [\Delta t'_{\%} \text{ aus (18a)}], \tag{19a}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta n_{\%}}{p} \cdot k \cdot n_{st} = \Delta t_{\%}(k \cdot n_{st}) \quad [\Delta t_{\%} \text{ aus (18b)}]. \tag{19b}$$

Der Formel (2):

$$\Delta s = \frac{v_1 + v_2}{2} \cdot \Delta t$$

entspricht allgemein:

$$\Delta s_{\%} = \frac{n_{1\%} + n_{2\%}}{2} \cdot \Delta t_{\%}. \tag{20}$$

Genau wie oben erhält man:

$$\Delta s = \Delta s'_{\%} \frac{\varrho \cdot G_M}{K \cdot M d_{st}} (k \cdot n_{st})^2 \quad [\Delta s'_{\%} \text{ aus (20) mit } \Delta t'_{\%} \text{ aus (18a)}], \tag{21a}$$

$$\Delta s = \Delta s_{\%} \cdot (k \cdot n_{st})^2 \quad [\Delta s_{\%} \text{ aus (20) mit } \Delta t_{\%} \text{ aus (18b)}]. \tag{21b}$$

Der Formel (3a):

$$\Delta (Jt) = \frac{J_{E_1} + J_{E_2}}{2} \cdot \Delta t$$

entspricht allgemein:

$$\Delta (Jt)_{\%} = \frac{J_{E_{1\%}} + J_{E_{2\%}}}{2} \cdot \Delta t_{\%}. \tag{22}$$

Mit J_{st} = Stundenstrom erhält man:

$$\Delta (Jt) = \Delta (Jt)'_{\%} \frac{J_{st} \cdot k \cdot n_{st} \cdot \varrho \cdot G_M}{K \cdot M d_{st}} \quad [\Delta (Jt)'_{\%} \text{ aus (22) mit } \Delta t'_{\%} \text{ aus (18a)}], \tag{23a}$$

$$\Delta (Jt) = \Delta (Jt)_{\%} (J_{st} \cdot k \cdot n_{st}) \quad [\Delta (Jt)_{\%} \text{ aus (22) mit } \Delta t_{\%} \text{ aus (18b)}], \tag{23b}$$

der Formel (4a):

$$\Delta (J^2 t) = \frac{J^2_{M_1} + J^2_{M_2}}{2} \cdot \Delta t$$

entspricht allgemein:

$$\Delta (J^2 t)_{\%} = \frac{J^2_{M_{1\%}} + J^2_{M_{2\%}}}{2} \cdot \Delta t_{\%}. \tag{24}$$

Genau wie vor erhält man:

$$\Delta(J^2t) = \Delta(J^2t)'_{\%} \cdot \frac{J_{st}^2 \cdot k \cdot n_{st} \cdot \varrho \cdot G_M}{K \cdot M d_{st}} \quad [\Delta(J^2t)'_{\%} \text{ aus (24) mit } \Delta t'_{\%} \text{ aus (18a)}], \quad (25a)$$

$$\Delta(J^2t) = \Delta(J^2t)_{\%} \cdot (J_{st}^2 \cdot k \cdot n_{st}) \quad [\Delta(J^2t)_{\%} \text{ aus (24) mit } \Delta t_{\%} \text{ aus (18b)}]. \quad (25b)$$

Setzt man in den Formeln (19), (21), (23) und (25) nicht die Prozentteilwerte $\Delta \ldots$ für einzelne Abschnitte des Fahrdiagrammes ein, sondern die Prozentgesamtwerte $\Sigma\Delta \ldots$ für ein ganzes Fahrdiagramm, also für eine ganze Fahrt oder mehrere Fahrten, so erhält man auch die entsprechenden tatsächlichen Werte.

d) Wattstundenverbrauch.

Sind in einem Triebwagen nur zwei Motoren (eine Einheit) eingebaut, so werden sie für die volle Fahrspannung E[1]) bemessen und, von der Anfahrt auf Reihe abgesehen, parallel geschaltet. Pro Triebwagen erhält man die Gesamt-Amperesekunden A nach Gleichung (23a) bzw. (23b), die Wattstunden dann zu $\frac{E \cdot A}{3600}$. Will man die Wattstunden pro tkm (Wst/tkm) ermitteln, so ist durch den Weg S in km und das Zuggewicht in t pro Triebwagen zu dividieren. Hierbei ist zu bedenken, daß der Wert A für eine „Einheit", also für zwei Motoren bestimmt war; es ist daher durch das auf zwei Motoren entfallende Zuggewicht $2 \cdot G_M$ zu dividieren, so daß man erhält:

$$\text{Wst/tkm} = \frac{E\,A}{3600\,S\,2\,G_M}. \quad (26)$$

Diese Gleichung läßt sich noch vereinfachen, wenn man beim Berechnen der Prozentfahrschaulinien den „Wattstundenfaktor" $V_{\%} = \frac{\Sigma\Delta(Jt)_{\%}}{\Sigma\Delta s_{\%}}$, d. h. Amp.-sk pro Wegeinheit (in Prozenten), bestimmt. Die effektiven Amp.-sk pro m Weg sind dann:

$$V_m = V_{\%} \cdot \frac{J_{st}}{k \cdot n_{st}} \quad [\text{vgl. Gl. (23) und (21)}];$$

die pro km Weg:

$$V_{km} = V_{\%} \cdot \frac{1000 \cdot J_{st}}{k \cdot n_{st}}.$$

In ähnlicher Weise wie vorher ergibt sich dann für den Wattstundenverbrauch pro tkm:

$$\text{Wst/tkm} = V_{\%} \cdot \frac{1000 \cdot J_{st} \cdot E}{3600 \cdot k \cdot n_{st} \cdot 2 \cdot G_M} = V_{\%} \frac{E \cdot J_{st}}{7{,}2 \cdot G_M \cdot k \cdot n_{st}}. \quad (27)$$

Auch diese Gleichung läßt sich noch weiter umformen, da $\frac{E \cdot J_{st} \cdot \eta_M}{1000}$ die Motorstundenleistung L_{st} in KW (Abgabe) darstellt. Die Stundenleistung L_{st} ist ferner gleich $\frac{M d_{st} \cdot n_{st}}{973}$. Man erhält dann die Formel:

$$\text{Wst/tkm} = V_{\%} \frac{139 \cdot L_{st}}{G_M \cdot \eta_M \cdot k \cdot n_{st}} = V_{\%} \frac{0{,}143 \cdot M d_{st}}{\eta_M \cdot k \cdot G_M}\,^{2}). \quad (28)$$

---

[1]) E konstant angenommen.

[2]) Unter Berücksichtigung der Gleichung (16) kann man auch schreiben: $\text{Wst/tkm} = V_{\%} \frac{0{,}143}{\eta_M \cdot k \cdot G_{M\%}}$.

Hierbei ist es gleichgültig, ob man $V_{\%}$ nach dem ersten oder dem zweiten Verfahren berechnet hat, da der Beschleunigungsfaktor ψ im Zähler und Nenner erscheint.

Sind in einem Triebwagen vier Motoren eingebaut, so sind zwei Motoren entweder dauernd in Reihe oder dauernd parallel geschaltet; die Reihen-Parallelschaltung beim Anfahren bleibt jedoch trotzdem bestehen.

Zwei dauernd in Reihe geschaltete Motoren, deren Nennspannung also gleich der halben Fahrspannung E ist, haben stets gleichen Strom, so daß die „pro Einheit" bestimmten Prozent-Amp.-sk und auch der Wattstundenfaktor $V_{\%}$ gleichzeitig für alle vier Motoren gelten. Zur Bestimmung der Wst/tkm ist jedoch jetzt durch das vierfache Zuggewicht pro Motor G_M zu dividieren, so daß Gleichung (27) übergeht in:

$$\text{Wst/tkm} = V_{\%} \cdot \frac{E \cdot J_{\text{st}}}{14{,}4 \cdot G_M \cdot k \cdot n_{\text{st}}}. \qquad (27\,\text{a})$$

Da die Nennspannung jedes Motors gleich $\frac{E}{2}$, ihre Stundenleistung also $= \frac{\frac{E}{2} \cdot J_{\text{st}} \cdot \eta_M}{1000}$ ist, wird $E \cdot J_{\text{st}} = \frac{2 \cdot 1000 \cdot L_{\text{st}}}{\eta_M}$. Es bleibt somit die Formel (28) auch bei vier Motoren je Triebwagen, je zwei fest in Reihe geschaltet, bestehen.

Sind endlich bei vier Motoren im Triebwagen je zwei dauernd parallel geschaltet, hat man also zwei „Einheiten" pro Triebwagen, so ist für den Wattstundenverbrauch pro tkm wiederum die Formel (28) gültig, denn man braucht ja gar nicht erst die für eine Einheit gefundenen Wattstunden mit 2 zu multiplizieren und dann wieder durch das vierfache Zuggewicht pro Motor zu dividieren.

e) Motorbeanspruchung.

Die Erwärmung eines Motors würde ihre zulässige Grenze im Dauerbetrieb beim Dauerstrom, der erfahrungsgemäß bei selbstlüftenden Bahnmotoren ca. 70% des Stundenstromes beträgt, erreichen; da jedoch im Bahnbetrieb die Stromstärke nicht konstant ist, müßte man bei genauen Untersuchungen die einzelnen Erwärmungs- bzw. Abkühlungskurven bestimmen und erhielte so einen eingehenden Überblick über die Erwärmungsverhältnisse. Dieses umständliche Verfahren kann man gegebenenfalls vermeiden, indem man die für die einzelnen Streckenabschnitte (also zwischen je zwei Stationen) gefundenen Werte der Amp.²-sk addiert und durch eine Zeit Θ dividiert, die gleich der Summe der Einzelfahrzeiten, also der Gesamtfahrzeit, vermehrt um etwa den vierten Teil der Summe aller Haltezeiten ist. (Die Haltezeiten sind deshalb zu etwa ein Viertel ihres Wertes einzusetzen, da die Zeitkonstante selbstlüftender Reihenschluß-Bahnmotoren im Stillstand etwa viermal so groß ist wie im Lauf.) Man kann gegebenenfalls ohne Bedenken noch weiter vereinfachen, indem man nur für die mittlere Stationsentfernung ein Fahrdiagramm berechnet und dessen Amp.²-sk mit der Zahl der Streckenabschnitte multipliziert und durch die erwähnte Zeit Θ dividiert. Tritt nun auf den Zwischen- und Endstationen kein längerer Aufenthalt ein, so daß ein Viertel sämtlicher Haltezeiten nur einen hinreichend kleinen Teil der reinen Gesamtfahrzeit beträgt, so geht man in der Praxis wohl meistens so vor, daß man zur Entscheidung über die Verwendbarkeit eines Motors hinsichtlich der Erwärmung nur die Amp.²-sk für das mittlere Fahrdiagramm heranzieht und für die Zeit Θ nur die Fahrzeit $T = \Sigma \Delta t$ für die mittlere Stationsentfernung einsetzt, die Haltezeit also vernachlässigt.

In allen Fällen erhält man durch Radizierung des Ausdrucks $\frac{\Sigma\Delta(J^2t)}{\Theta}$ einen „quadratischen Mittelwert" für den Strom pro Motor, der als für die Erwärmung des Motors maßgebend angesehen werden soll. Dieser Mittelwert mag „Motorbeanspruchung" genannt werden, da er den Strom darstellt, mit dem der Motor hinsichtlich seiner Erwärmung im Mittel dauernd beansprucht wird. Ist er gleich dem Dauerstrom, so reicht der Motor aus; ist er größer, so wird der Motor zu warm, und ist er kleiner, so ist der Motor nicht ausgenutzt. Es darf also die Motorbeanspruchung nicht größer als ca. 70 % des Stundenstromes sein, in Prozentwerten nicht größer als 0,7, denn $\sqrt{\frac{\Sigma\Delta(J^2t)}{\Theta}} = J_{st} \cdot \sqrt{\frac{\Sigma\Delta(J^2t)_{\%}}{\Theta_{\%}}}$ [vgl. Gleichung (25) und (19)]. Wird zur Berechnung der Motorbeanspruchung für $\Theta_{\%}$ unter Vernachlässigung der Haltezeit nur die reine Fahrzeit $T_{\%} = \Sigma\Delta t_{\%}$ eingesetzt und der Ausdruck $\sqrt{\frac{\Sigma\Delta(J^2t)_{\%}}{T_{\%}}}$ mit $B_{\%}$ bezeichnet, so erhält man dafür Werte, die um einen gewissen Betrag zu groß sind, was man evtl. dadurch kompensieren kann, daß man die Grenze für $B_{\%}$ etwas höher als angegeben wählt. Da der absolute Wert B der Motorbeanspruchung nicht interessiert sondern nur sein Verhältnis $B_{\%}$ zum Stundenstrom, so soll dieser Wert hinfort Motorbeanspruchung genannt, der Einfachheit wegen aber nur mit B bezeichnet werden[1]).

f) Räumungszeit.

In einem Stadtschnellbahnbetrieb ist die Zugfolgezeit von großer Bedeutung, denn je mehr Züge innerhalb einer gewissen Zeit über die Strecke gefahren werden können, desto größer ist das Platzangebot und desto kürzer auch die Zeit, die die Fahrgäste evtl. auf einen Zug warten müssen. Die Zugfolgezeit wird nun durch verschiedene Faktoren bestimmt. In erster Linie durch die Haltezeit selbst, die man daher möglichst klein zu halten bestrebt sein wird[2]). Ferner muß die Geschwindigkeit eines Zuges, mit der er sich einer Station nähert, bei konstanter Bremsverzögerung einen von der Zuglänge abhängigen und mit ihr wachsenden Wert haben, wenn die Summe aus Einfahrzeit und Bremszeit ein Minimum werden soll[2]). Da ein Zug erst dann freie Einfahrt in eine Station bekommt, wenn sein Vorzug einen bestimmten Weg seit seiner Abfahrt, den „Räumungsweg", zurückgelegt hat, erkennt man, welche Bedeutung der Anfahrbeschleunigung zukommt, da sie ja die Zeit für Durchfahren dieses Räumungsweges, die „Räumungszeit", bestimmt[2]). Es ist hier nicht der Ort, alle diese Einzelfaktoren hinsichtlich ihres Einflusses auf die Zugfolgezeit zu untersuchen, nur die mittlere Beschleunigung über den Räumungsweg (die „Räumungsbeschleunigung") soll bei den beiden Anfahrarten betrachtet werden.

---

[1]) Die Heranziehung des „quadratischen Mittelwertes" (Effektivwert) des Motorstromes zur Beurteilung der Erwärmungsverhältnisse in Motoren für Bahnanlagen der betrachteten Art ist in der Praxis bei Projektierungsarbeiten vielfach üblich. Es soll hier nicht untersucht werden, ob und wie weit ein solches Verfahren zulässig ist, seine Anwendung in dieser Arbeit jedoch erscheint gerechtfertigt.

In diesem Zusammenhang mag auf folgende Aufsätze hingewiesen sein: H. Osborne, Beitrag zur Ermittlung von Aussetzleistungen, ETZ 1922, H. 20. — F. Éliás, Beitrag zur Vorausberechnung der Erwärmungskurven von Triebmotoren el. Fahrzeuge, El. Bahnen, Juli 1927. — Eine Methode zur genauen Ermittlung der Endtemperaturen und der Wärmeübergangszahlen von Bahnmotoren, Zentralbl. f. d. el. Zugb., März 1928.

[2]) Siehe z. B. W. Bethge: EKB, 1913 H. 11 u. a. O.

g) Zeitrückhalt.

Es gibt für jede Stationsentfernung bei bestimmten Werten für Anfahrbeschleunigung und Bremsverzögerung sowie bei bestimmten Motoren und Zuggewichten eine kürzeste Fahrzeit, wenn man nämlich den Motorstrom erst mit Beginn des Bremsens ausschaltet. Es wäre nun verkehrt, auf diesen Fahrzeiten die Fahrpläne aufbauen zu wollen. Gerade im Schnellbahnbetrieb mit seiner dichten Zugfolge und der stark wechselnden Zugbesetzung kommen häufig unvermeidbare kleinere Verspätungen vor, die sich aber doch auf den ganzen Fahrplan sehr störend auswirken können[1]). Die normale Fahrzeit ist daher etwas größer zu wählen als die kürzeste, damit solche kleinen Verspätungen zwischen möglichst wenigen Stationen wieder ausgeglichen werden können; es ist also eine genügend bemessene Zeitreserve, ein Zeitrückhalt, vorzusehen[2]). Bei unveränderlicher Anfahrbeschleunigung und Bremsverzögerung muß daher der Strom schon vor dem Ansetzen der Bremse ausgeschaltet und ein „Auslauf" des Zuges in das Fahrdiagramm eingefügt werden. In diesem Zusammenhang erscheint es gerechtfertigt, die Zeit, die unter Strom gefahren wird, mit „Stromgabezeit" zu bezeichnen, so daß ein Fahrdiagramm in folgende Abschnitte zerfallen kann: Anfahrperiode, Fahrt mit voller Spannung am Motor (beide zusammen gleich der Stromgabezeit), Auslauf und Bremsperiode. Bei Fortfall des Auslaufes erhält man die kürzeste Fahrzeit, und zwar mit der größtmöglichsten Stromgabezeit und ohne Zeitrückhalt. Als Zeitrückhalt soll das Verhältnis der normalen Fahrzeit zur kürzesten aufgefaßt werden.

III. Durchführung der Berechnungen.

Den Berechnungen werden folgende Werte zugrunde gelegt: Prozentcharakteristik nach Bild 6, Zugkraftkonstante $K = 10$, Geschwindigkeitskonstante k daher $= 0{,}01$, Prozentzuggewicht pro Motor $G_{M\%} = 0{,}28$, Fahrwiderstand w in kg/t $= 3{,}5$ und Massenfaktor $\varrho = 107{,}65$.

Für die Berechnung werden die Formeln (17), (18b), (20), (22) und (24) benutzt.

Die Ergebnisse für geradlinige Anfahrt ohne Feldschwächung zeigt Bild 7. Es sind für 8 verschiedene Prozentanfahrströme $J_{M\%}$ pro Motor in Abhängigkeit vom Prozentweg $\Sigma\Delta s_{\%}$ aufgetragen: Die Prozentzeit $\Sigma\Delta t_{\%}$, die Räumungsbeschleunigung p_w in m/sk² und die jeweilige Prozentfahrgeschwindigkeit $v_{\%}$. Diese Räumungsbeschleunigung p_w ist gleich $\frac{2 \cdot \Sigma\Delta s_{\%}}{(\Sigma\Delta t_{\%})^2}$. Als maximale Anfahrbeschleunigung ist $\sim 0{,}8$ m/sk² gewählt. Die einzelnen Kurven gehen von je einer Ausgangskurve g aus, die die Beendigung der Anfahrperiode kennzeichnet.

In gleicher Weise sind solche Kurven auch für die gebrochene Anfahrt ohne Feldschwächung berechnet und für fünf verschiedene Prozent-Anfahrströme $J_{M\%}$ pro Motor auf Reihe in Bild 8 dargestellt. Es ist dabei angenommen, daß der Anfahrstrom pro Motor $J_{M\%}$ infolge geeigneter Bemessung der Anfahrwiderstände sofort auf den halben Reihenwert sinkt, wenn der Übergang von der Reihenschaltung zur Parallelschaltung in dem Augenblick vorgenommen wird, wo die Geschwindigkeit auf den der Reihencharakteristik entsprechenden Wert gestiegen ist, wie in Bild 2

[1]) Siehe z. B. Ph. Pforr: Berechnung von Zugbewegungen (Verlag Oldenbourg), sowie O. Christiansen: Die theoretische Bedeutung der Anfahrbeschleunigung für die Leistungsfähigkeit einer Stadtschnellbahn. Glas. Ann. 1919.

[2]) Siehe z. B. W. Bethge: EKB 1918, H. 5 u. ETZ 1927, S. 1905.

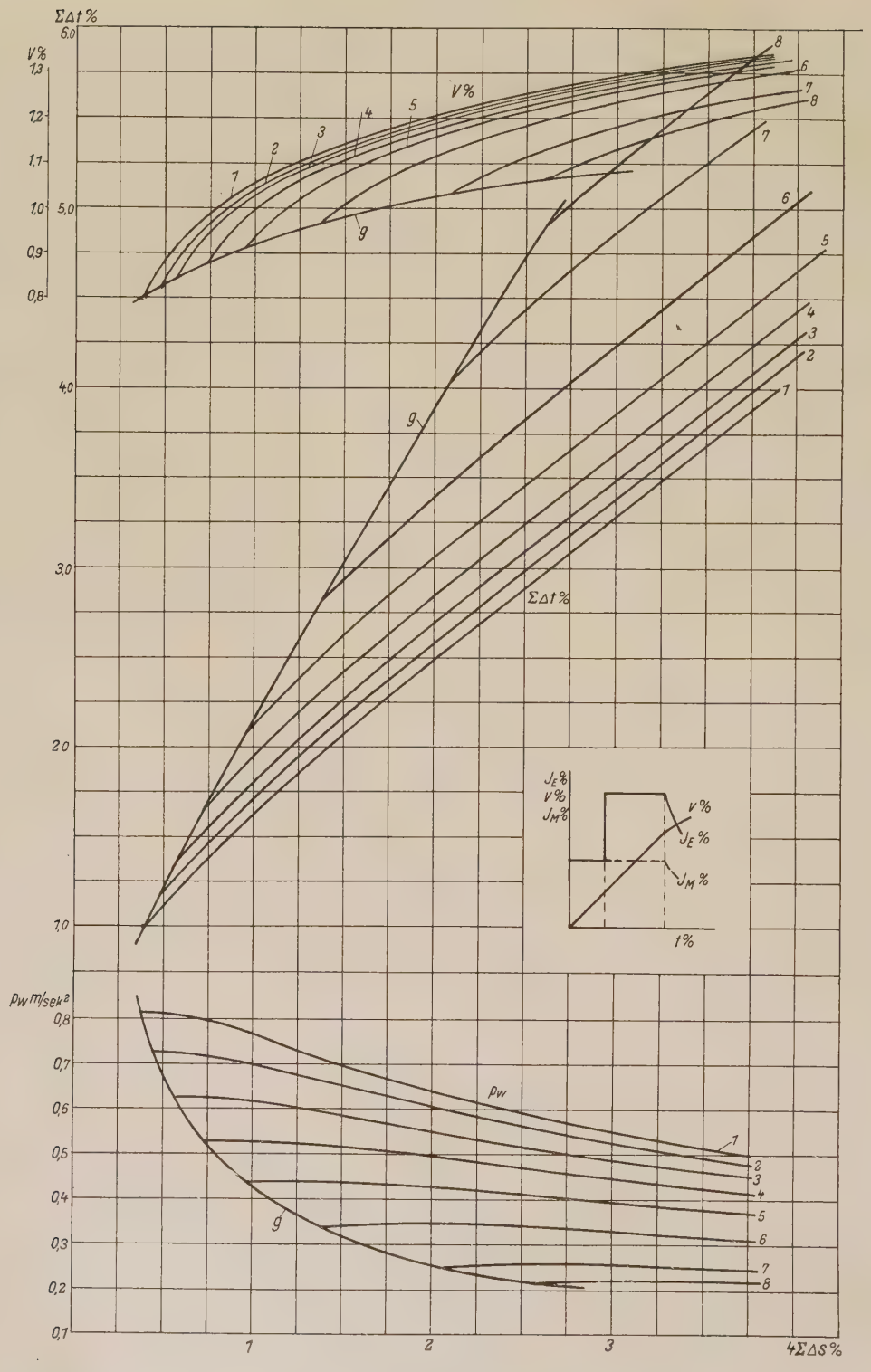

Bild 7. Geradlinige Anfahrt ohne Feldschwächung.

Kurven *1*: $J_{M\,0/0}=2{,}24$; Kurven *2*: $J_{M\,0/0}=2{,}02$; Kurven *3*: $J_{M\,0/0}=1{,}79$; Kurven *4*: $J_{M\,0/0}=1{,}57$;
Kurven *5*: $J_{M\,0/0}=1{,}35$; Kurven *6*: $J_{M\,0/0}=1{,}12$; Kurven *7*: $J_{M\,0/0}=0{,}90$; Kurven *8*: $J_{M\,0/0}=0{,}81$.

schematisch gezeigt wurde. Beläßt man dagegen die Motoren auch nach Erreichung der Reihencharakteristik noch in der Reihenschaltung, so wird der Strom unter Abnahme der Beschleunigung und Zunahme der Geschwindigkeit entsprechend der Reihencharakteristik sinken. Man wird in diesem Fall den Übergang zur Parallel-

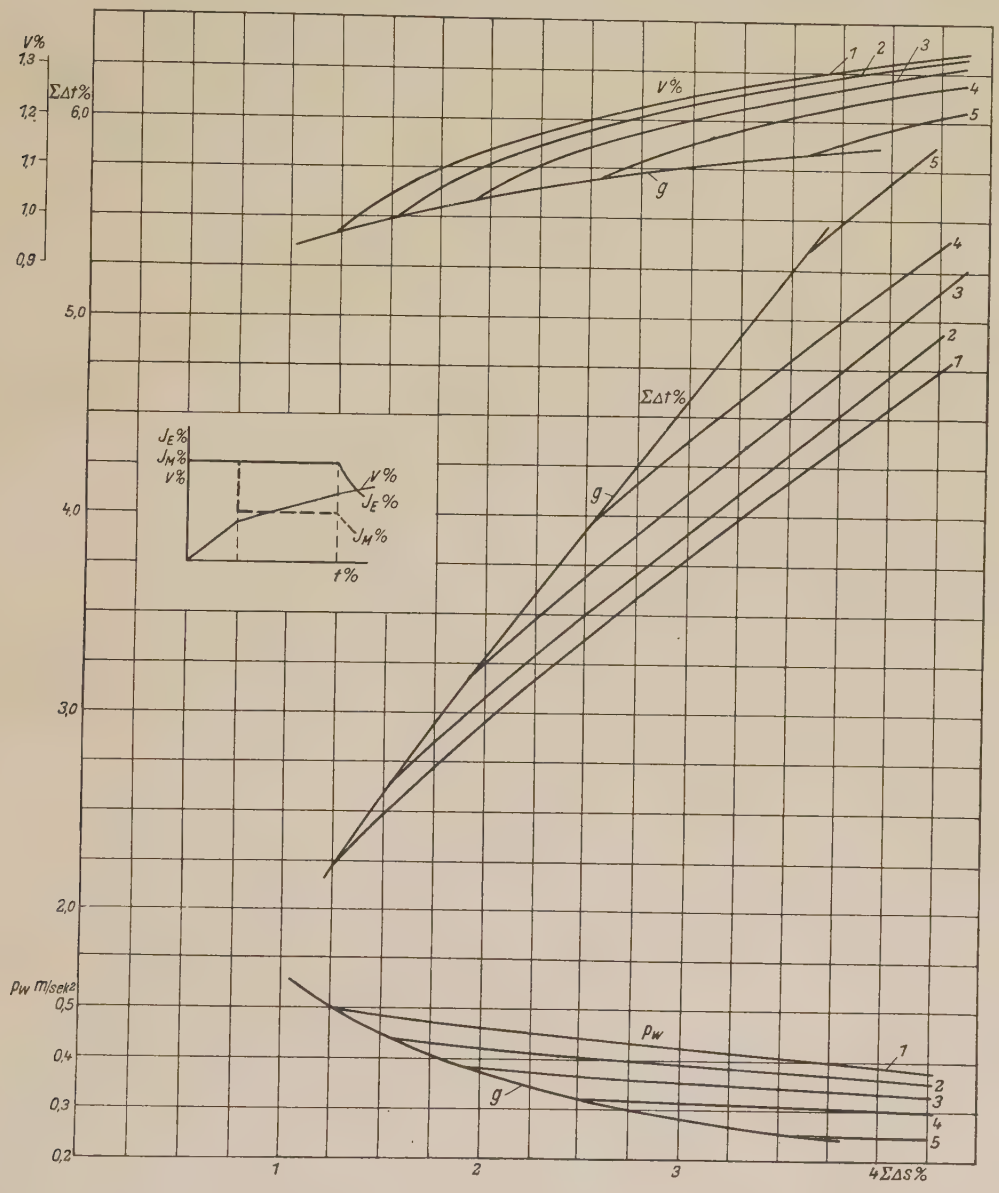

Bild 8. Gebrochene Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe und ohne Feldschwächung.
Kurven *1*: J_{M}% auf Reihe = 2,24; Kurven *2*: J_{M}% auf Reihe = 2,02; Kurven *3*: J_{M}% auf Reihe = 1,79;
Kurven *4*: J_{M}% auf Reihe = 1,57; Kurven *5*: J_{M}% auf Reihe = 1,35.

schaltung dann vornehmen, wenn der Strom auf den halben Reihenwert abgeklungen ist, und kann daher eine solche Anfahrart „gebrochene Anfahrt mit Auslauf auf Reihe" nennen. Bild 9 zeigt schematisch diesen Fall, wobei die bekannten Bezeichnungen wieder gewählt sind.

Im Gegensatz hierzu wird man dann der gebrochenen Anfahrt nach Bild 2, deren Ergebnisse Bild 8 zeigte, die Bezeichnung „gebrochene Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe" beilegen müssen.

In Bild 10 sind die Ergebnisse der gebrochenen Anfahrt mit Auslauf auf Reihe aufgetragen, die auf die gleiche Weise wie die in Bild 7 und 8 gefunden sind.

Da früher von der Bedeutung der Räumungszeit gesprochen wurde, sollen daraufhin gleich hier die Ergebnisse nach Bild 7, 8 und 10 untersucht werden, zumal die als Abszissen aufgetragenen Prozentwege in der Größe von Null bis $\sum \Delta_{S\%} = 4{,}0$ entsprechend Gleichung (21b) bei Stundendrehzahlen von $600 \div 1000$ und dem gewählten Wert $k = 0{,}01$ effektive Wege von max. etwa $150 \div 400$ m ergeben, also im wesentlichen Räumungswege darstellen dürften.

Bild 11 zeigt für einen beliebig herausgegriffenen Prozent-Räumungsweg $S_{R\%} = 3{,}0$ in Abhängigkeit vom Anfahrstrom pro Motor $J_{M\%}$ auf Reihe die Räumungsbeschleunigung p_w für geradlinige Anfahrt und gebrochene Anfahrt ohne und mit Auslauf auf Reihe. Bei gleichen Prozent-Motorströmen auf Reihe hat die geradlinige Anfahrt größere Räumungsbeschleunigung (also kürzere Prozent-Räumungszeit) als die gebrochene Anfahrt, und bei dieser liegt wieder die mit Auslauf auf Reihe höher als die ohne Auslauf. Bei gleichem Strom $J_{E\%}$ pro Einheit auf Parallel ist die Räumungsbeschleunigung bei geradliniger Anfahrt kleiner als bei gebrochener. Für gleiche Räumungsbeschleunigung hat die geradlinige Anfahrt den größten maximalen Strom pro Einheit $J_{E\%}$, die gebrochene mit Auslauf den kleinsten. (Dieser Strom $J_{E\%}$ ist bei der geradlinigen Anfahrt gleich dem doppelten, bei der gebrochenen Anfahrt gleich dem einfachen Motorstrom $J_{M\%}$ auf Reihe, vgl. S. 170).

Setzt man die in den Bildern 7, 8 und 10 wiedergegebenen Berechnungen für größere Wege fort, läßt man also die Motoren weiter auf ihrer Parallelcharakteristik (d. h. mit voller Nennspannung) arbeiten und beginnt die Bremsung (Bremsverzögerung $p_b = 1\,\mathrm{m/sk^2}$ angenommen) gleichzeitig mit dem Ausschalten des Stromes, so erhält man die betreffenden kürzesten Prozent-Fahrzeiten; vgl. Bild 12. Es sind hier in Abhängigkeit von der Prozent-Stationsentfernung $S_{\%}$ folgende Werte für vier verschiedene Prozent-Anfahrströme pro Motor $J_{M\%}$ bei geradliniger Anfahrt aufgetragen: Prozent-Fahrzeit $T_{\%}$, mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{\mathrm{mtl.}\%} = S\% : T\%$, maximal erreichte Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{e\%}$ (zugleich Prozent-Bremsgeschwindigkeit $v_{B\%}$) und endlich die Beanspruchung $B = \sqrt{\frac{\sum \Delta (J^2 t)_{\%}}{T_{\%}}}$. Man erkennt, daß bei konstanter Anfahrbeschleunigung mit wachsender Prozent-Stationsentfernung die mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit bei gleichzeitiger Abnahme von B steigt. Man sieht aber auch, daß selbst bei kleinen Prozent-Anfahrströmen im Bereich kleiner Prozent-Stationsentfernungen die als zulässig angenommene Motorbeanspruchung $B = 0{,}7$ erheblich überschritten wird. Zieht man z. B. bei $B = 0{,}7$ eine Wagerechte G und überträgt die Schnittpunkte mit den B-Kurven auf die entsprechenden Kurven für $v_{\mathrm{mtl.}\%}$, so erhält man hier eine Grenzkurve G, die die maximal (d. h. ohne Motorüberlastung) erreichbare mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit darstellt. Aus dieser Tatsache aber etwa zu schließen, daß man bei kleinen Prozent-Stationsentfernungen auf große Anfahrbeschleunigung verzichten müsse, ist verfrüht, da schon angedeutet wurde, daß die kürzeste Fahrzeit doch nicht dem normalen Betrieb zugrunde gelegt werden darf. Es muß daher festgestellt werden, wie groß der Einfluß des Auslaufes ohne Strom auf B ist.

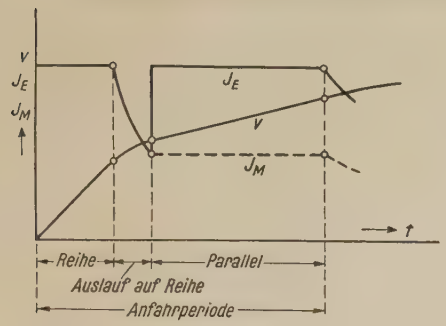

Bild 9. Veranschaulichung der gebrochenen Anfahrt mit Auslauf auf Reihe.

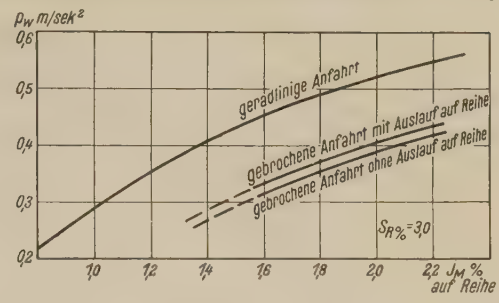

Bild 11. Vergleich der geradlinigen sowie gebrochenen Anfahrt ohne und mit Auslauf auf Reihe hinsichtlich Räumungsbeschleunigung für einen Prozenträumungsweg $S_{R\,0/0} = 3{,}0$.

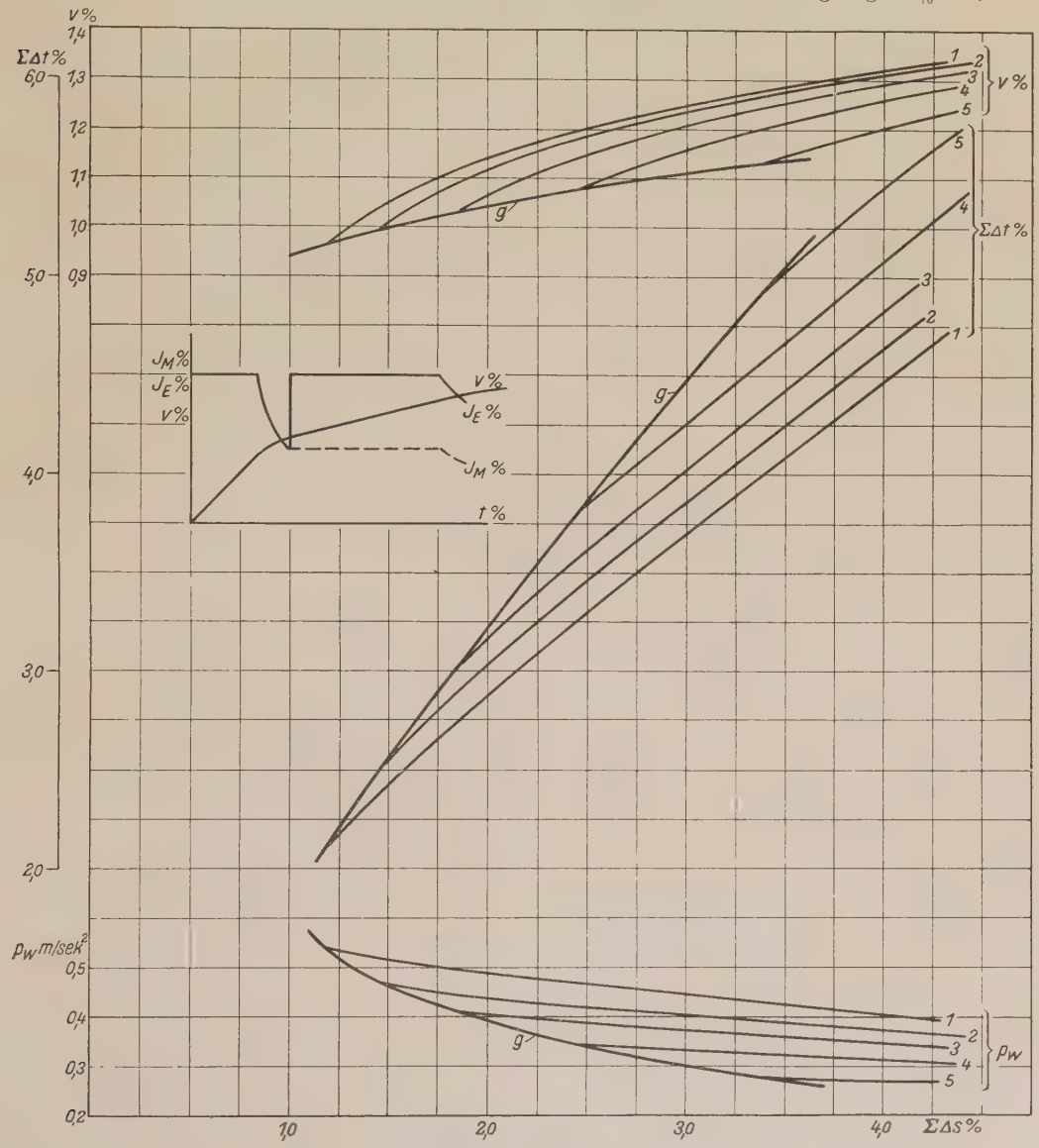

Bild 10. Gebrochene Anfahrt mit Auslauf auf Reihe, ohne Feldschwächung.

Kurven *1*: $J_{M\,0/0}$ auf Reihe = 2,24; Kurven *2*: $J_{M\,0/0}$ auf Reihe = 2,02; Kurven *3*: $J_{M\,0/0}$ auf Reihe = 1,79; Kurven *4*: $J_{M\,0/0}$ auf Reihe = 1,57; Kurven *5*: $J_{M\,0/0}$ auf Reihe = 1,35.

Zu diesem Zweck sind die gleichen Werte wie in Bild 12 nochmals mit verschiedenen Stromgabezeiten berechnet und in Bild 13 aufgezeichnet. Diese Ergebnisse wurden auf folgende Weise gefunden: Es ist zu beliebiger Zeit $\sum \Delta t_{\%} = \tau_{1\%}$ (Stromgabezeit) ein Auslauf ohne Strom eingefügt, dessen Zeitdauer $t_{a\%}$ in einem bestimm-

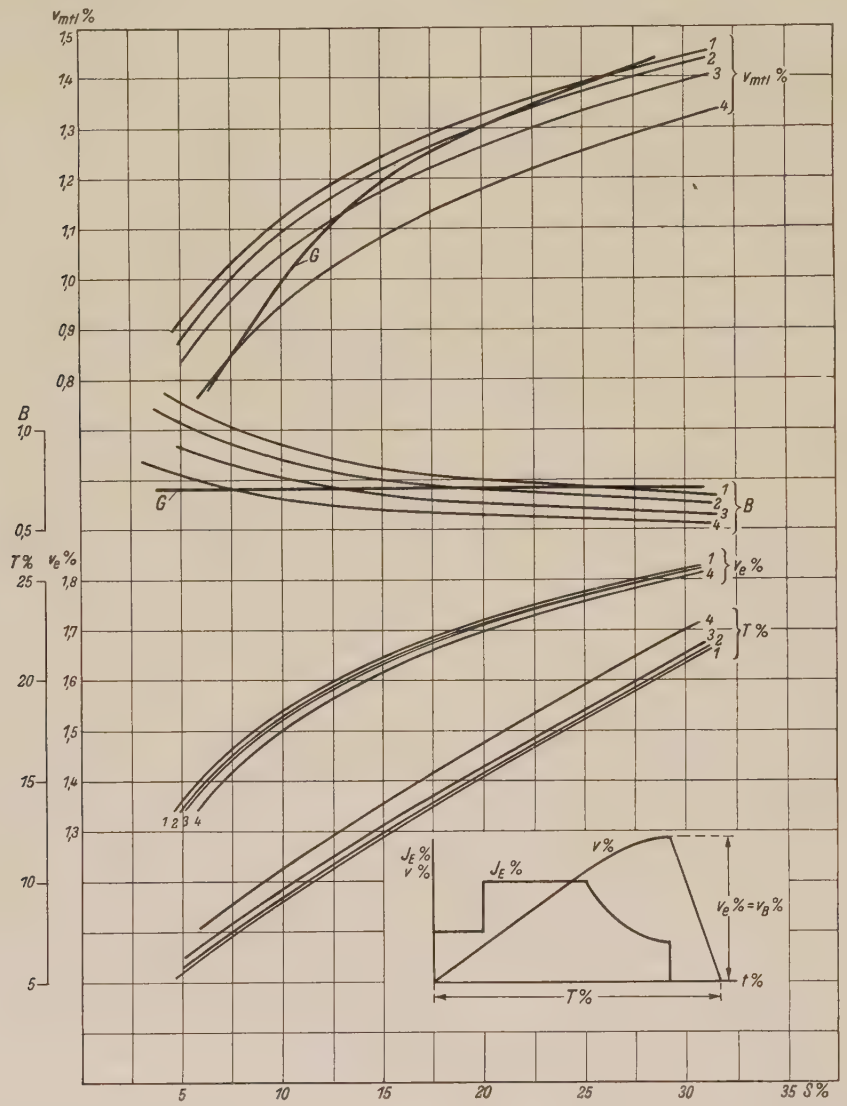

Bild 12. Kürzeste Prozentfahrzeiten bei geradliniger Anfahrt ohne Feldschwächung. (Bremsverzögerung = 1 m/sk².)

Kurven *1*: $J_{M\,0/0} = 2{,}24$; Kurven *2*: $J_{M\,0/0} = 1{,}79$; Kurven *3*: $J_{M\,0/0} = 1{,}35$; Kurven *4*: $J_{M\,0/0} = 0{,}90$.

ten Verhältnis zur vorhergehenden Fahrzeit $\tau_{1\%}$ steht, und dann erst die Bremsung angesetzt (vgl. Bild 14); für konstante Stromgabezeit $\tau_{1\%}$ ergeben sich also bei verschiedenen Auslaufzeiten $t_{a\%}$ auch verschiedene Gesamtfahrzeiten $T_{\%}$ und Wege $S_{\%}$. Aus den in Bild 14 gewählten Bezeichnungen ergibt sich:

$$\frac{\tau_{1\%}}{\tau_{1\%} + t_{a_{1\,0/0}}} = \varphi_1; \qquad \frac{\tau_{1\%}}{\tau_{1\%} + t_{a_{2\,0/0}}} = \varphi_2 \text{ usw.},$$

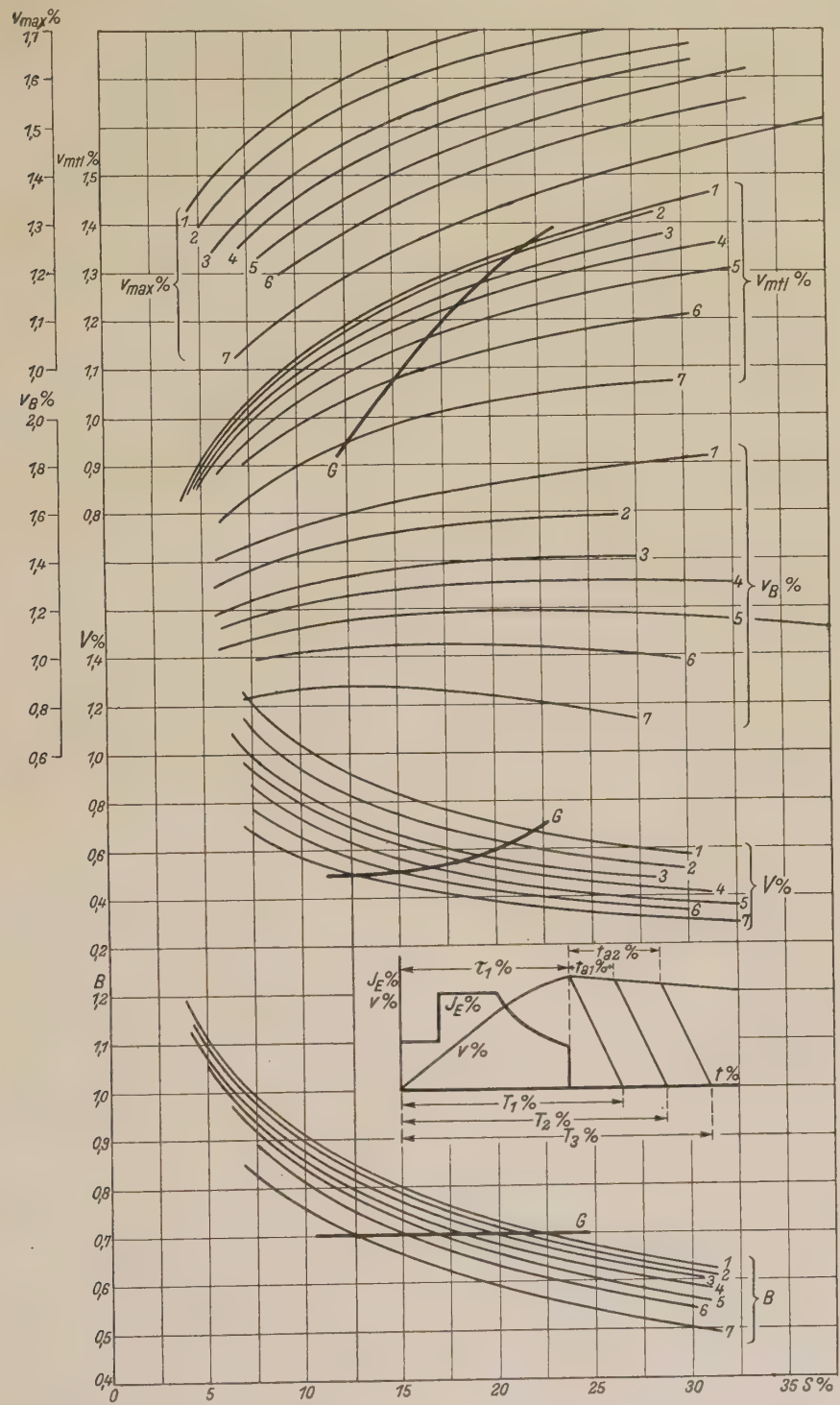

Bild 13. Einfluß des Auslaufes ohne Strom. Geradlinige Anfahrt mit $J_{M\%} = 2{,}24$.

Kurven *1*: Auslauffaktor $\varphi = 1{,}0$; Kurven *2*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}8$; Kurven *3*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}6$;
Kurven *4*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}5$; Kurven *5*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}4$; Kurven *6*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}3$;
Kurven *7*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}2$.

allgemein:

$$\frac{\tau_{n\%}}{\tau_{n\%} + t_{a_{n\%}}} = \varphi_n; \qquad t_{a_{n\%}} = \tau_{n\%}\left(\frac{1}{\varphi_n} - 1\right).$$

Die Gesamtfahrzeit $T_{\%}$ ergibt sich dann als Summe aus Stromgabezeit $\tau_{\%}$, Auslaufzeit $t_{a\%}$ und Bremszeit $t_{b\%}$.

Bild 13 gilt für geradlinige Anfahrt mit $J_{M\%} = 2{,}24$, ohne Feldschwächung; für den „Auslauffaktor" φ wurden 7 verschiedene Werte gewählt. Es sind in Abhängigkeit von der Prozent-Stationsentfernung $S_{\%}$ außer der mittleren Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}\%}$ und der Motorbeanspruchung B auch die maximal erreichte Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{\max\%}$ bei Beginn des Auslaufes (also zur Zeit $\tau_{n\%}$), die Prozent-Bremsgeschwindigkeit $v_{B\%}$ und endlich der Wattstundenfaktor $V_{\%} = \frac{\sum \Delta(Jt)_{\%}}{\sum \Delta s_{\%}}$ aufgetragen. Mit wachsender Prozent-Stationsentfernung nimmt wieder die mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit zu und die Beanspruchung B ab; desgl. nimmt $V_{\%}$ ab, während die Prozent-Maximalgeschwindigkeit steigt. Die Prozent-Bremsgeschwindigkeit verhält sich verschieden: Bei großen Werten für den Auslauffaktor φ, also bei verhältnismäßig kleinen Auslaufzeiten $t_{a\%}$, steigt sie mit wachsendem Prozentweg, bei kleinen Werten von φ dagegen steigt sie erst an und

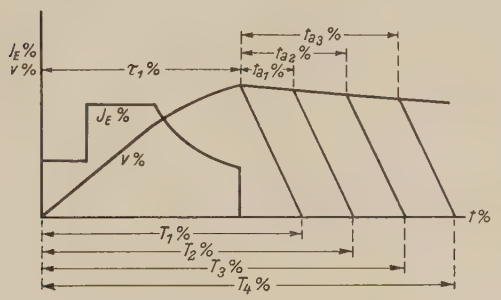

Bild 14. Fahrdiagramme mit konstanter Stromgabezeit $\tau_{1\,0/0}$, aber veränderlicher Auslaufzeit ohne Strom $t_{a\,0/0}$.

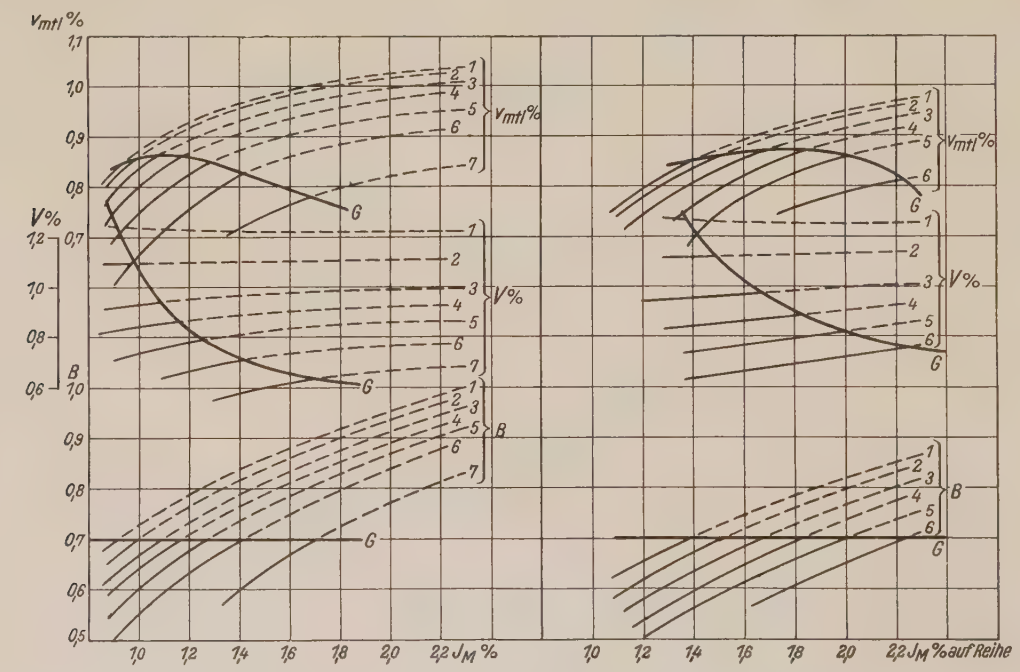

Bild 15. Prozentstationsentfernung $S_{0/0} = 7{,}5$. Ermittlung der Grenzkurven für $B_{\max} = 0{,}7$. Links: geradlinige Anfahrt; rechts: gebrochene Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe.

Kurven *1*: Auslauffaktor $\varphi = 1{,}0$; Kurven *2*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}8$; Kurven *3*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}6$; Kurven *4*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}5$; Kurven *5*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}4$; Kurven *6*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}3$; Kurven *7*: Auslauffaktor $\varphi = 0{,}2$.

fällt dann wieder. Bei konstantem Prozentweg nehmen alle Größen mit abnehmendem φ (also wachsender Auslaufzeit) ab.

Konstruiert man in gleicher Weise wie in Bild 12 wieder Grenzkurven G, so erkennt man, daß bei konstanter Anfahrbeschleunigung mit wachsendem Prozentwege der Wert für φ steigen muß, wenn der Motor stets ausgenutzt sein soll. Der geeignet bemessene Auslauf ohne Strom erlaubt es also, selbst bei kleinen Prozent-Stationsentfernungen große Anfahrbeschleunigung zu verwenden.

In gleicher Weise, wie in Bild 13 angedeutet, sind die Berechnungen auch mit anderen Prozent-Anfahrströmen sowie auch für gebrochene Anfahrt vorgenommen; aus der kurvenmäßigen Darstellung der Ergebnisse ist dann Bild 15 konstruiert, in dem für geradlinige Anfahrt und gebrochene Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe folgende Größen in Abhängigkeit vom Anfahrstrom $J_{M\%}$ pro Motor auf Reihe aufgetragen wurden: die mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}\%}$, die Motorbeanspruchung B und der Wattstundenfaktor $V_{\%}$, und zwar für verschiedene Auslauffaktoren φ und konstante Prozent-Stationsentfernung $S_{\%} = 7{,}5$. Konstruiert man auch hier wieder die Grenzkurven für $B = 0{,}7$, so erkennt man, daß bei dem gewählten Prozentweg der günstige Einfluß wachsender Anfahrbeschleunigung auf die mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit begrenzt ist. Die ohne Überschreitung von $B = 0{,}7$ maximal erreichbare mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}\%}$ steigt zunächst mit wachsendem Prozent-Anfahrstrom an, um dann wieder abzunehmen; sie beginnt mit der Kurve für $\varphi = 1$ (kein Auslauf ohne Strom) und erfordert dann einen immer kleiner werdenden Auslauffaktor φ, also eine abnehmende Stromgabezeit. — Aus der Grenzkurve für $V_{\%}$ ersieht man, daß diese Größe bei $\varphi = 1$ und wachsender Anfahrbeschleunigung nahezu konstant bleibt und dann mit abnehmendem φ ebenfalls abnimmt.

Man könnte nun an Hand der Grenzkurven die beiden Anfahrarten miteinander vergleichen. Es empfiehlt sich aber z. B. nicht, den Wattstundenfaktor $V_{\%}$ für den Maximalwert der mittleren Prozent-Fahrgeschwindigkeit bei beiden Anfahrarten zu vergleichen, da für dieses Maximum der betreffende Prozent-Anfahrstrom nicht genau zu fixieren ist. Mit Sicherheit dagegen läßt sich feststellen, daß z. B. bei gleichen Anfahrströmen $J_{E\%}$ pro Einheit (z. B. für $J_{E\%} = 2{,}0$; d. h. für $J_{M\%} = 1{,}0$ geradlinig und $J_{M\%} = 2{,}0$ gebrochen, sogar bei etwa gleichen Fahrzeiten) die gebrochene Anfahrt einen erheblich kleineren Wattstundenfaktor $V_{\%}$ zur Folge hat. Aus den p_w-Kurven des Bildes 11 findet man ferner, daß z. B. für einen Prozent-Räumungsweg $S_{R\%} = 3{,}0$ bei den gewählten Strömen die gebrochene Anfahrt eine wesentlich höhere Räumungsbeschleunigung, also kürzere Räumungszeit bedingt. Diese Ergebnisse lassen die gebrochene Anfahrt als günstiger erscheinen, doch haben sie als Vergleich der beiden Anfahrarten keine große Bedeutung, da die betreffenden Auslauffaktoren φ verschieden sind. Ein stichhaltiger Vergleich zweier Fahrdiagramme ist nämlich nur möglich, wenn sie für denselben Weg gleiche Fahrzeit und gleichen Zeitrückhalt, also gleiche kürzeste Fahrzeit ergeben[1]).

Es erhebt sich jetzt die berechtigte Frage, wie sich die Verhältnisse bei größeren Prozent-Stationsentfernungen ändern; daß sie sich ändern, darf man annehmen, da die eigentliche Anfahrt dann einen immer kleiner werdenden Teil der Gesamtfahrt ausmacht. Den Einfluß der Prozent-Stationsentfernung zeigt nun Bild 16; es sind hier in Abhängigkeit vom Anfahrstrom pro Motor $J_{M\%}$ auf Reihe die mit $B_{\max} = 0{,}7$

[1]) Nur dann nämlich besteht bei beiden Fahrdiagrammen die gleiche Sicherheit zur Einhaltung des Fahrplanes. Siehe auch E. E. Seefehlner: Elektrische Zugförderung S. 138; u. a. O.

erreichbaren mittleren Prozent-Fahrgeschwindigkeiten $v_{\text{mtl.}\%}$ (d. h. also die $v_{\text{mtl.}\%}$ Grenzkurven G, wie sie in Bild 15 z. B. für $S_{\%} = 7{,}5$ gefunden wurden) für verschiedene Prozent-Stationsentfernungen (7,5, 10, 15 und 20) aufgetragen, und zwar ausgezogen für geradlinige Anfahrt und gestrichelt für gebrochene Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe. Je größer die Prozent-Stationsentfernung ist, bei desto größeren Anfahrströmen wird bei konstantem Auslauffaktor $\varphi = 1$ die gewählte Beanspruchungsgrenze $B = 0{,}7$ erreicht, d. h. bis zu größeren Anfahrströmen bewirkt eine Steigerung der Anfahrbeschleunigung noch eine Erhöhung der mittleren Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}\%}$.

Verbindet man die Punkte der Grenzkurven für $v_{\text{mtl.}\%}$ in Bild 16, bei denen die gewählte Beanspruchungsgrenze $B_{\max} = 0{,}7$ erreicht wird, so erhält man zwei Kurven, $R_{\text{geradl.}}$ bzw. $R_{\text{gebr.}}$, die folgendes besagen: Die links von ihnen verlaufenden Geschwindigkeitslinien geben absolute Maxima der mittleren Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}\%}$ an, denn hier enthält das Fahrdiagramm keinen Auslauf, es wird mit größtmöglicher Stromgabezeit die bei der gewählten Bremsverzögerung absolut kürzeste Prozent-Fahrzeit $T_{\%} = \dfrac{S\%}{v_{\text{mtl.}\%}}$ gefahren. Rechts von den R-Kurven dagegen geben die Geschwindigkeitslinien nur mehr „relative" Maxima für $v_{\text{mtl.}\%}$ an, die bei $B_{\max} = 0{,}7 =$ konst. erreicht werden. (Die absoluten Maxima würden hier höher liegen, und zwar um so höher, je größer die Anfahrbeschleunigung und je kleiner die Prozent-Stationsentfernung ist, und zwar unter entsprechender Vergrößerung der Motorbeanspruchung B.) In diesem Bereich enthält also das Fahrdiagramm einen mit wachsender Beschleunigung abnehmenden Auslauffaktor φ. Oder anders ausgedrückt: Das linke Gebiet der absoluten Maxima für $v_{\text{mtl.}\%}$ enthält keinerlei Zeitreserve, das rechte Gebiet der relativen Maxima für $v_{\text{mtl.}\%}$ dagegen enthält eine mit wachsender Beschleunigung zunehmende Zeitreserve, die jedoch nur bei Überschreitung von $B_{\max} = 0{,}7$ ausgenutzt werden kann. Mit wachsendem Prozentweg $S_{\%}$ nimmt diese Zeitreserve bei konstanter Anfahrbeschleunigung ab.

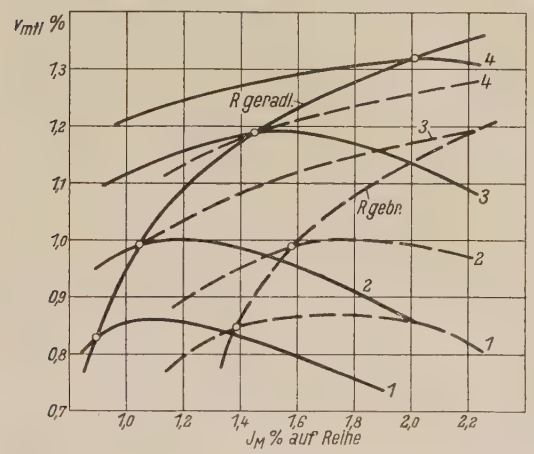

Bild 16. Grenzkurven bei $B_{\max} = 0{,}7$ für die mittlere Prozentfahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}\%}$ bei geradliniger (———) und gebrochener Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe (- - -).

Kurven *1*: Prozentstationsentfernung $S_{\%} = 7{,}5$;
„ *2*: „ „ $S_{\%} = 10$;
„ *3*: „ „ $S_{\%} = 15$;
„ *4*: „ „ $S_{\%} = 20$.

Um auch im linken Gebiet der absoluten Maxima für $v_{\text{mtl.}\%}$ eine Zeitreserve zu erhalten, muß in das Fahrdiagramm unter entsprechender Herabsetzung der mittleren Fahrgeschwindigkeit ein Auslauf eingefügt werden. Zeichnerisch ließe sich das darstellen durch Geschwindigkeitskurven, die um den Prozentsatz des Zeitrückhaltes unter den Kurven für die absoluten Maxima liegen; dabei ist der Motor aber um so weniger ausgenutzt, je kleiner die Anfahrbeschleunigung ist.

Wieweit die im rechten Gebiet der relativen Maxima für $v_{\text{mtl.}\%}$ enthaltene Zeitreserve im praktischen Betrieb ausgenutzt werden kann, hängt davon ab, welche Beanspruchung B man bei Ausnutzung dieses Zeitrückhaltes zulassen will. Man muß

also den betreffenden Bahnbetrieb so weit kennen bzw. übersehen können, daß man abschätzen kann, wie groß der Zeitrückhalt sein muß und wie oft er in Anspruch genommen wird, in welchem Maße also die dadurch bedingte, zeitweilig höhere Motorbeanspruchung die Motorerwärmung zu beeinflussen imstande ist. Es können in diesem Fall die in Bild 16 angegebenen Grenzkurven für eine höhere Beanspruchungsgrenze als 0,7 konstruiert werden, wodurch sich natürlich die neuen R-Kurven nach rechts verschieben, doch bleiben die links von den früheren R-Kurven liegenden absoluten Maxima unverändert. Für den normalen Betrieb kämen wieder Geschwindigkeitskurven in Betracht, die um den prozentualen Zeitrückhalt unter den neuen Grenzkurven liegen, jedoch darf dabei die für Normalbetrieb gewählte Beanspruchungsgrenze $B_{max} = 0{,}7$ nicht überschritten werden. Das soll durch Bild 17 erläutert werden, das für geradlinige Anfahrt und $S_{\%} = 10$ gilt. Es ist in Abhängigkeit vom Prozent-Anfahrstrom pro Motor $J_{M\%}$ als Kurve *1* das absolute Maximum für $v_{mtl.\%}$, also bei $\varphi = 1$, aufgetragen; im Punkt R_1 ($J_{M\%} \cong 1{,}05$) wird $B = 0{,}7$ erreicht, im Punkte R_2 ($J_{M\%} \sim 1{,}33$) z. B. $B = 0{,}76$; die Kurve *2* stellt die Grenzkurve für $B = 0{,}7$ dar, die Kurve *3* eine solche für $B = 0{,}76$. Ferner ist eine 10% unter der Grenzkurve *3* liegende Geschwindigkeitskurve *4* aufgezeichnet, die dem normalen Betrieb zugeordnet werden soll. Diese Kurve *4* überschneidet jedoch bei R_3 ($J_{M\%} \cong 1{,}75$) die Grenzkurve *2* für $B = 0{,}7$, das für normalen Betrieb als Höchstgrenze angesehen wurde, so daß für die Normalgeschwindigkeit die Kurve gelten müßte, die als Kurve *4* beginnt und bei Punkt R_3 in Kurve *2* übergeht. Aus Bild 17 geht hervor, daß die Kurve für die normale Geschwindigkeit links von R_3 um so höher liegt, je kleiner der Zeitrückhalt ist und je größer die zulässige Beanspruchung bei Ausnutzung der Zeitreserve ist (je höher also Kurve 3 liegt); rechts von R_3 jedoch muß sie mindestens mit der Grenzkurve 2 für $B_{max} = 0{,}7$ zusammenfallen. Bis zum Punkt R_3 ist der Motor nicht voll ausgenutzt.

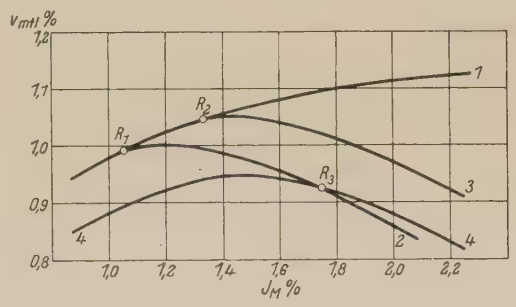

Bild 17. Geradlinige Anfahrt; Prozentstationsentfernung $S_{\%} = 10$.

Kurve *1*: Absolutes Maximum für $v_{mtl.\%}$ ($\varphi = 1{,}0$);
„ *2*: Grenzkurve für $B_{max} = 0{,}7$;
„ *3*: Grenzkurve für $B_{max} = 0{,}76$;
„ *4*: Geschwindigkeitskurve für $B_{max} = 0{,}76$ und 10% Zeitrückhalt.

Will man die zur Erreichung des Maximums an mittlerer Prozent-Fahrgeschwindigkeit erforderliche Anfahrbeschleunigung bzw. den Anfahrstrom pro Motor $J_{M\%}$ bestimmen, so sieht man aus den Grenzkurven in Bild 16, daß dieser mit wachsendem Prozentweg zunimmt. Bild 17 zeigt, daß er bei konstantem Weg und Berücksichtigung eines Zeitrückhaltes, wenn für dessen Ausnutzung eine höhere Beanspruchung als die normale zugelassen wird, ebenfalls steigt.

Es bedarf hier noch der Fall der Erwähnung, daß man geringfügige Verspätungen auch durch Erhöhung der Anfahrbeschleunigung aufholen kann; ein Blick auf Bild 16 zeigt jedoch, daß man hierbei unter Umständen ebenfalls eine höhere Beanspruchung als 0,7 zulassen muß. Vielfach wird jedoch im Hinblick auf dichte Zugfolge die Anfahrbeschleunigung so hoch gewählt, daß eine weitere Steigerung aus Rücksicht auf die Sicherheit der Fahrgäste nicht mehr möglich ist; außerdem würde evtl. auch der Zeitgewinn nicht groß sein.

Aus Bild 16 ist auch zu ersehen, daß möglichst kurze Prozent-Fahrzeit (große mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit) und möglichst große Anfahrbeschleunigung (Räumungsbeschleunigung!) bei kleinen Prozentwegen nicht vereinbar sind.

Es steht noch die Beantwortung der Frage aus, welche der beiden Anfahrarten hinsichtlich der Prozent-Fahrzeit günstiger ist. Auch hierüber kann Bild 16 Auskunft geben. Für die dargestellten Prozent-Anfahrströme ergeben beide Anfahrarten fast gleich große Höchstwerte für die mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit, erst bei großen Prozentwegen (etwa 20) liegt sie für geradlinige Anfahrt etwas höher; bei diesen Höchstwerten hat die geradlinige Anfahrt aber stets größeren maximalen Anfahrstrom $J_{E\%}$ pro Einheit zur Folge. Durch diese Feststellung drängt sich geradezu die Frage auf, wie sich bei den Anfahrströmen, die den höchsterreichbaren Prozent-Fahrgeschwindigkeiten zugeordnet sind, die Räumungsbeschleunigungen beider Anfahrarten verhalten. Soweit sich aus den Grenzkurven für $v_{\text{mtl.}\%}$ diese Anfahrströme hinreichend genau bestimmen lassen, kann man zu ihnen aus den p_w-Kurven

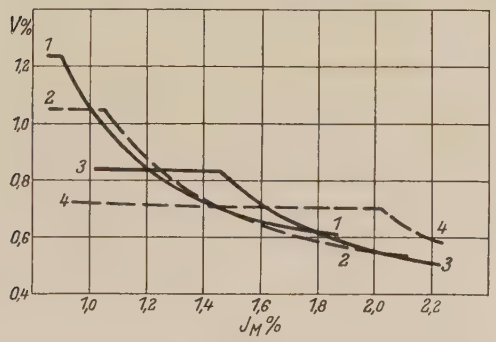

Bild 18. Grenzkurven für den Wattstundenfaktor $V_{0/0}$ bei $B_{\max} = 0{,}7$ und geradliniger Anfahrt.

Kurve 1: Prozentstationsentfernung $S_{0/0} = 7{,}5$.
„ 2: „ „ $S_{0/0} = 10$
„ 3: „ „ $S_{0/0} = 15$
„ 4: „ „ $S_{0/0} = 20$

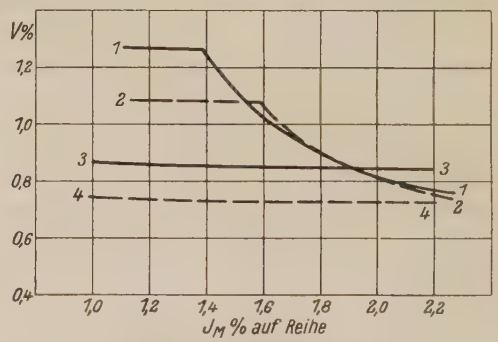

Bild 19. Grenzkurven für den Wattstundenfaktor $V_{0/0}$ bei $B_{\max} = 0{,}7$ und gebrochener Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe.

Kurve 1: Prozentstationsentfernung $S_{0/0} = 7{,}5$
„ 2: „ „ $S_{0/0} = 10$
„ 3: „ „ $S_{0/0} = 15$
„ 4: „ „ $S_{0/0} = 20$

der Bilder 7 und 8 die erreichbaren Räumungsbeschleunigungen entnehmen und findet folgende Beziehungen: Bei konstantem Prozent-Räumungsweg $S_{R\%}$ ist die Räumungsbeschleunigung p_w bei gebrochener Anfahrt und kleinen Prozent-Stationsentfernungen $S_\%$ etwas größer, bei mittleren Werten für $S_\%$ etwa gleich groß und bei großen Werten für $S_\%$ erheblich kleiner als bei geradliniger Anfahrt; sie wächst aber jeweils mit wachsender Prozent-Stationsentfernung $S_\%$, besonders bei geradliniger Anfahrt. Mit abnehmendem Prozent-Räumungsweg $S_{R\%}$ wächst die Räumungsbeschleunigung p_w bei konstanter Prozent-Stationsentfernung $S_\%$, und zwar um so mehr, je größer $S_\%$ ist, besonders wieder bei der geradlinigen Anfahrt.

Es sind bei diesen Feststellungen nur die p_w-Kurven berücksichtigt, die in den Bildern 7 und 8 aufgezeichnet sind, die also bei den Ausgangskurven g beginnen, die die Beendigung der Anfahrperiode angeben. Bei der geradlinigen Anfahrt ist die Räumungsbeschleunigung p_w während der Anfahrt, also auf Reihe und Parallel, konstant und gleich der Anfahrbeschleunigung p, d. h. die p_w-Kurven in Bild 7 verlaufen links von der Ausgangskurve g horizontal. Bei der gebrochenen Anfahrt (vgl. Bild 8) dagegen würden die p_w-Kurven von der Ausgangskurve g nach links weiter ansteigen, und zwar nur auf Parallel; man könnte sich also eine weitere Aus-

gangskurve g' denken, die die Erreichung der Reihencharakteristik darstellt und daher links von der die Erreichung der Parallelcharakteristik kennzeichnenden Ausgangskurve g liegt. Auf Reihe ist die Räumungsbeschleunigung p_w dann wieder unabhängig vom Prozentweg und gleich der Anfahrbeschleunigung p auf Reihe, daher also auch ebenso groß wie bei geradliniger Anfahrt und gleichgroßen Anfahrströmen. Bei gebrochener Anfahrt mit Auslauf auf Reihe gelten ähnliche Überlegungen.

Außer der Räumungsbeschleunigung und der mittleren Prozent-Fahrgeschwindigkeit interessiert auch der Wattstundenfaktor $V_{\%}$ in seiner Abhängigkeit von der Prozentstationsentfernung und unter Annahme einer Grenzbeanspruchung. In Bild 15 waren Kurven für $V_{\%}$ bei $S_{\%} = 7{,}5$ und verschiedenen Auslauffaktoren φ in Abhängigkeit vom Anfahrstrom pro Motor $J_{M\%}$ auf Reihe aufgetragen und aus ihnen dann die Grenzkurve bei $B = 0{,}7$ konstruiert. Bild 18 zeigt nun solche Grenzkurven für 4 verschiedene Stationsentfernungen bei geradliniger Anfahrt und Bild 19 bei gebrochener Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe. Diese Grenzkurven verlaufen annähernd horizontal, solange mit größtmöglicher Stromgabezeit bei $\varphi = 1$ gefahren wird, und fallen dann stark ab, da ja mit Rücksicht auf die Motorbeanspruchung ein Auslauf ohne Strom in das Fahrdiagramm eingefügt wurde. Im horizontalen Teil der Grenzkurven nimmt $V_{\%}$ mit wachsendem Prozentweg ab; mit steigendem Anfahrstrom überschneiden sich die $V_{\%}$-Grenzkurven, doch erkennt man, daß sie sich wieder Horizontalen nähern, die mit wachsendem Prozentweg um so tiefer liegen.

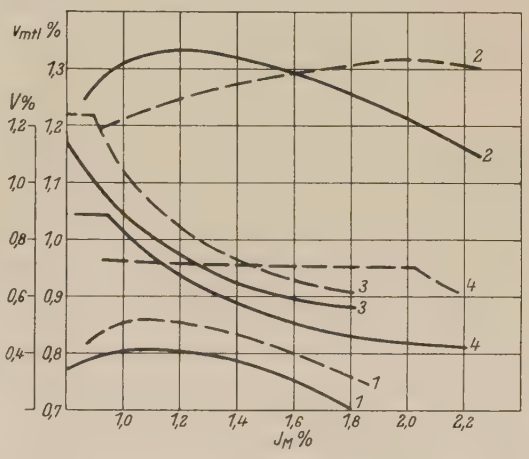

Bild 20. Einfluß der Feldschwächung bei geradliniger Anfahrt; mit Feldschwächung (———), ohne Feldschwächung (– – – –).

Kurven 1: $v_{\text{mtl.}\%}$-Grenzkurven für $S_{\%} = 7{,}5$
„ 2: $v_{\text{mtl.}\%}$- „ „ $S_{\%} = 20$
„ 3: $V_{\%}$- „ „ $S_{\%} = 7{,}5$
„ 4: $V_{\%}$- „ „ $S_{\%} = 20$
} $B_{\max} = 0{,}7$

Es soll jetzt noch gezeigt werden, welchen Einfluß die Feldschwächung sowie bei gebrochener Anfahrt der Auslauf auf Reihe haben. Es wird angenommen, daß sowohl auf Reihe als auch auf Parallel nach Abschaltung der Anfahrwiderstände die Erregung in zwei Stufen von 100 % über 70 % auf 50 % herabgesetzt wird. Stellt man unter dieser Voraussetzung die gleichen Berechnungen wie früher an und konstruiert die Grenzkurven, so kann man auch wieder ähnliche Schlüsse ziehen wie früher. An Hand des Bildes 20 soll jedoch gezeigt werden, daß Feldschwächung nicht immer ratsam erscheint. Es sind für geradlinige Anfahrt und die beiden Prozent-Stationsentfernungen 7,5 bzw. 20 die Grenzkurven bei $B_{\max} = 0{,}7$ für $v_{\text{mtl.}\%}$ und $V_{\%}$ in Abhängigkeit vom Anfahrstrom $J_{M\%}$ pro Motor aufgetragen. Die entsprechenden Kurven ohne Feldschwächung sind strichliert verzeichnet. Für die betrachteten Anfahrbeschleunigungen liegen bei $S_{\%} = 7{,}5$ die Grenzkurven mit Feldschwächung unter denen ohne Feldschwächung, bei $S_{\%} = 20$ dagegen liegen sie teilweise darüber, teilweise darunter. Solange eine prozentuale Erhöhung der mittleren Prozent-Fahrgeschwindigkeit infolge Feldschwächung höher ist als eine prozentuale Erhöhung von $V_{\%}$, erscheint die Anwendung der Feldschwächung vorteilhaft; erst recht natürlich,

wenn bei Geschwindigkeitserhöhung sogar Herabsetzung von $V_{\%}$ eintritt. (Es darf hier darauf aufmerksam gemacht werden, daß der Faktor K bei Anwendung der Feldschwächung nicht verändert wurde[1]). Für gebrochene Anfahrt würde man ähnliche Verhältnisse wie in Bild 20 finden.

Endlich bliebe noch zu untersuchen, welchen Einfluß der Auslauf auf Reihe bei gebrochener Anfahrt hat. Das zeigt Bild 21. Es gelten hier sinngemäß die gleichen Überlegungen wie bei Bild 20, so daß man feststellen kann: Bei großen Prozentwegen empfiehlt sich der Auslauf auf Reihe, bei kleinen dagegen wohl nur bei geringen Anfahrbeschleunigungen. Immerhin ist der Einfluß des Auslaufes auf Reihe nicht so groß wie der der Feldschwächung, wenigstens bei großen Prozentwegen. Bei gebrochener Anfahrt können sich Auslauf auf Reihe sowie Feldschwächung bei passenden Verhältnissen in ihren günstigen Auswirkungen überlagern, andernfalls jedoch aufheben oder gar ungünstig beeinflussen.

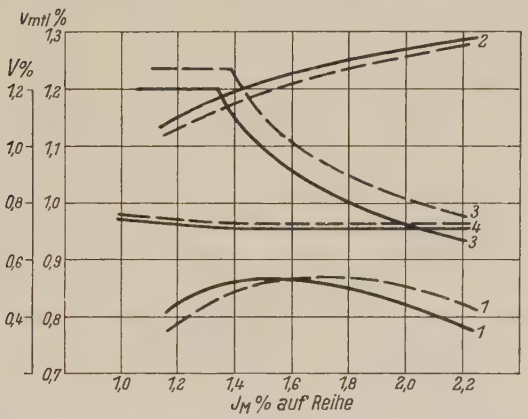

Bild 21. Einfluß des Auslaufes auf Reihe bei gebrochener Anfahrt; mit Auslauf auf Reihe (———), ohne Auslauf auf Reihe (– – – –).

Kurven 1: $v_{\text{mtl.}\%}$-Grenzkurven für $S_{\%}=7{,}5$
„ 2: $v_{\text{mtl.}\%}$- „ „ $S_{\%}=20$
„ 3: $V_{\%}$- „ „ $S_{\%}=7{,}5$
„ 4: $V_{\%}$- „ „ $S_{\%}=20$
} $B_{\max}=0{,}7$.

Daß die bisher gefundenen Ergebnisse zahlenmäßig eine Änderung erfahren, wenn für die Zugkraftkonstante K, den Fahrwiderstand w in kg/t oder das Prozentzuggewicht pro Motor $G_{M\%}$ andere Werte als die gewählten eingesetzt werden, ist selbstverständlich, es soll jedoch darauf verzichtet werden, alle Kurven daraufhin nochmals zu berechnen. Man könnte aber gegen das bisherige Berechnungsverfahren den Vorwurf erheben, daß es trotz Verwendung von Prozentwerten noch nicht so allgemein gültig ist, wie es der Projektierungsingenieur sich wünschen mag. Es ist jedoch schon ein Verfahren genannt, das diesen Wünschen zwar nicht vollkommen, doch aber weitergehend gerecht werden zu können verspricht, so daß es zweckmäßig erscheint, hier — wenigstens kurz — darauf einzugehen. Das bisher benutzte Rechenverfahren ging von der tatsächlichen Beschleunigung in m/sk² aus, die nach Gleichung (17): $p = \dfrac{K \cdot Md_{\%}}{\varrho \cdot G_{M\%}} - \dfrac{w}{\varrho}$ bestimmt wurde. Das andere Berechnungsverfahren ist durch die Gleichungen (12) bis (14) gekennzeichnet, die nochmals in folgende Gleichung zusammengefaßt werden sollen:

$$p = \frac{K \cdot Md_{\text{st}}}{\varrho \cdot G_M} \cdot [Md_{\%} - (Md_{\%})_{p=0}] = \psi \cdot p_{\%} \,. \tag{29}$$

Um die Neuberechnung sämtlicher bisher gezeichneten Kurven zu vermeiden, liegt es nahe, den Beschleunigungsfaktor ψ, der ja nicht nur das Verhältnis der effektiven Beschleunigung zur Prozent-Beschleunigung, sondern auch das Verhältnis einiger der nach beiden Berechnungsverfahren gefundenen Prozentwerte darstellt [vgl. Gleichung (19), (21), (23) und (25)], so zu wählen, daß sich nach beiden Berechnungsver-

[1]) Über den Einfluß des Übersetzungsverhältnisses vgl. z. B. W. Bethge: EKB 1918, H. 5 u. 9.

fahren der gleiche Wert für die effektive Beschleunigung ergibt. Das würde für $\psi = \frac{K \cdot Md_{st}}{\varrho \cdot G_M} = \frac{K}{\varrho \cdot G_{M\%}} = 0{,}332$ zutreffen [vgl. hierzu Gleichung (29) und (16)], wenn man den Wert für $(Md_{\%})_{p=0}$ entsprechend wählt; dieses Prozentmoment (für Beschleunigung gleich Null) muß im vorliegenden Fall 0,098 sein, wie man es aus der Gleichung (10): $\psi \cdot (Md_{\%})_{p=0} = \frac{w}{\varrho}$ erhält. Unter diesen Voraussetzungen bleiben alle bisher aufgezeichneten Kurven bestehen, wenn für Prozentzeit, Prozentweg und Räumungsbeschleunigung entsprechende Maßstäbe gewählt werden, während alle Prozentgeschwindigkeiten sowie die Größen B und $V_{\%}$ unverändert bleiben. Man erhält die bei Verwendung der Prozentbeschleunigung $p_{\%}$ gültigen Werte für die Prozentzeit $T'_{\%}$ und für den Prozentweg $S'_{\%}$ durch Multiplikation der früher gefundenen Werte $T_{\%}$ und $S_{\%}$ mit $\psi = 0{,}332$, während p_w durch ψ zu dividieren ist, um $p_{w\%}$ zu erhalten. Dann aber gelten auch wieder die früher festgestellten Beziehungen und Zusammenhänge und die gezogenen Schlußfolgerungen.

IV. Anwendung der gefundenen Ergebnisse.

In Bild 16 wurden Kurven für die mittlere Prozent-Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}\%}$ für verschiedene Prozent-Stationsentfernungen $S_{\%}$ in Abhängigkeit vom Prozent-Anfahrstrom $J_{M\%}$ pro Motor auf Reihe aufgezeichnet. Beim Übergang auf effektive Werte muß nach früher Gesagtem (vgl. S. 177) die Prozent-Fahrgeschwindigkeit mit $k \cdot n_{st}$ und der Prozentweg mit $(k \cdot n_{st})^2$ multipliziert werden. Da der Wert für k schon durch die Wahl von K festgelegt ist, ($k = 0{,}01$), bliebe also nur der Einfluß der Motorstundendrehzahl zu untersuchen. Man wird daher für die vier Prozentwege 20, 15, 10 und 7,5 die erforderliche Stundendrehzahl n_{st} so bestimmen, daß eine beliebig gewählte Stationsentfernung S_{eff} (in m) konstant bleibt [vgl. Gl. (21 b)]; die effektive mittlere Fahrgeschwindigkeit v_{mtl} in m/sk erhält man dann aus dem entsprechenden Prozentwert $v_{\text{mtl.}\%}$ durch Multiplikation mit $k \cdot n_{st}$. Bild 22 zeigt für die Stationsentfernungen 730 m (etwa die mittlere Stationsentfernung der Berliner Hochbahn) und 1130 m (etwa die mittlere Stationsentfernung der Berliner Stadtbahn) in Abhängigkeit von der Motor-Stundendrehzahl n_{st} die entsprechend den Grenzkurven für geradlinige Anfahrt in Bild 16 maximal erreichbare effektive mittlere Fahrgeschwindigkeit, die also bei jeder Stundendrehzahl (Prozent-Stationsentfernung) eine bestimmte Anfahrbeschleunigung bedingt. Das Optimum wird bei 730 m etwa mit $n_{st} = 850$ U. p. M. erreicht, bei 1130 m jedoch erst mit etwa 1100 U. p. M. Um also möglichst kurze Fahrzeit zu erhalten, müßte mit wachsender effektiver Stationsentfernung S auch die Stundendrehzahl des Motors erhöht werden. Legt man dem Bild 22 nicht die Maximalwerte der Grenzkurven in Bild 16 zugrunde, sondern Werte, die einer bestimmten, für alle Prozentwege konstanten Anfahrbeschleunigung entsprechen, so erhält man Ergebnisse, wie sie in Bild 22

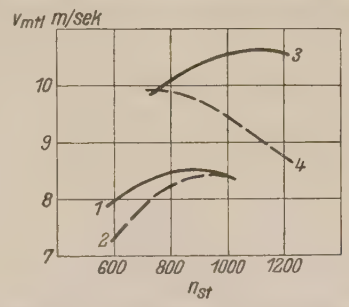

Bild 22. Ermittlung der mit Rücksicht auf kurze Fahrzeit günstigsten Stundendrehzahl bei geradliniger Anfahrt. Bei den Kurven *1* und *3* sind die Maximalwerte der Grenzkurven für $v_{\text{mtl.}\%}$ bei geradliniger Anfahrt verwendet (vgl. Bild 16), für Kurve *2* ist $J_{M\%} = 1{,}0$ und für Kurve *4* $J_{M\%} = 2{,}0$.
Kurven *1*: eff. Stationsentfernung $S = 730$ m
„ *2*: „ „ $S = 730$ „
„ *3*: „ „ $S = 1130$ „
„ *4*: „ „ $S = 1130$ „

die strichlierten Kurven zeigen, und zwar für 730 m Stationsentfernung bei einem Anfahrstrom $J_{M\%} = 1{,}0$ und für 1130 m bei $J_{M\%} = 2{,}0$. Je ein Beispiel für kleine und große Anfahrbeschleunigung ist absichtlich gewählt, da man auf diese Weise gut den verschiedenen Einfluß der Stundendrehzahl erkennt. Hinsichtlich kurzer Fahrzeit erweist sich also bei kleiner Anfahrbeschleunigung eine relativ[1]) größere Stundendrehzahl als günstig, bei großer Anfahrbeschleunigung dagegen eine relativ kleinere. Die Erklärung liegt in der Form der Geschwindigkeitsgrenzkurven in Bild 16.

Nach dem Gesagten ist es leicht, an Hand der Bilder 16, 20 und 21 festzustellen, wie sich die Verhältnisse durch Anwendung der gebrochenen Anfahrt mit und ohne Auslauf auf Reihe oder der Feldschwächung ändern. Auch kann man sich ein Bild über den Wattstundenverbrauch pro tkm verschaffen, wenn man aus den entsprechenden $V_{\%}$-Kurven die zugehörigen Werte entnimmt und nach Gleichung (28) in effektive Werte umrechnet.

Da früher auf die Bedeutung der Räumungsbeschleunigung hingewiesen wurde, soll sie und ihr Einfluß auf die Stundendrehzahl an einem Zahlenbeispiel besprochen werden. Für eine Stationsentfernung $S = 1130$ m betrage der Räumungsweg S_R z. B. 14%, d. h. $0{,}14 \cdot 1130 =$ ca. 158 m, für den eine Räumungsbeschleunigung $p_w = 0{,}5$ m/sk² vorgeschrieben sei; aus Rücksicht auf die Fahrgäste soll jedoch die Anfahrbeschleunigung den Wert $\sim 0{,}8$ m/sk² nicht übersteigen.

Setzt man als Prozent-Stationsentfernung $S_{\%}$ die Werte 20, 15, 10 und 7,5 ein, so erhält man die betreffenden Prozenträumungswege $S_{R\%}$ jeweils zu 14% von $S_{\%}$, d. h. zu 2,8 bzw. 2,1 bzw. 1,4 bzw. 1,05. Entnimmt man hierzu aus den p_w-Kurven in Bild 7 die bei geradliniger Anfahrt erforderlichen Anfahrströme $J_{M\%}$ pro Motor, so erhält man:

$$\text{für } S_{R\%} = 1{,}05 \quad \text{und} \quad S_{R\%} = 1{,}4 : J_{M\%} = \sim 1{,}5,$$
$$\text{für } S_{R\%} = 2{,}1 : J_{M\%} = \sim 1{,}6$$
$$\text{für } S_{R\%} = 2{,}8 : J_{M\%} = \sim 1{,}8.$$

Zu diesen Anfahrströmen erhält man dann aus Bild 16 die Grenzgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}\%}$ bei $B_{\max} = 0{,}7$ (ohne Zeitrückhalt) und aus Bild 18 den Wattstundenfaktor $V_{\%}$ zu:

$v_{\text{mtl.}\%} = \sim 0{,}81$ bei $S_{\%} = 7{,}5$ mit $V_{\%} = \sim 0{,}68$, $S_{R\%} = 1{,}05$ und $J_{M\%} \cong 1{,}5$;

$v_{\text{mtl.}\%} = \sim 0{,}97$ bei $S_{\%} = 10$ mit $V_{\%} = \sim 0{,}68$, $S_{R\%} = 1{,}4$ und $J_{M\%} \cong 1{,}5$;

$v_{\text{mtl.}\%} = \sim 1{,}19$ bei $S_{\%} = 15$ mit $V_{\%} = \sim 0{,}72$, $S_{R\%} = 2{,}1$ und $J_{M\%} \cong 1{,}6$;

$v_{\text{mtl.}\%} = \sim 1{,}305$ bei $S_{\%} = 20$ mit $V_{\%} = \sim 0{,}7$, $S_{R\%} = 2{,}8$ und $J_{M\%} \cong 1{,}8$.

Mit $k = 0{,}01$ errechnen sich die Stundendrehzahlen für die Stationsentfernung $S = 1130$ m nach Gleichung (21b) zu:

$$n_{\text{st}} = \sim 1230 \text{ bei } S_{\%} = 7{,}5$$
$$n_{\text{st}} = \sim 1060 \text{ bei } S_{\%} = 10$$
$$n_{\text{st}} = \sim 870 \text{ bei } S_{\%} = 15$$
$$n_{\text{st}} = \sim 750 \text{ bei } S_{\%} = 20.$$

[1]) Nämlich bezogen auf die Stundendrehzahlen, die bei den betrachteten Prozentstationsentfernungen ein absolutes Maximum für die effektive mittlere Fahrgeschwindigkeit ergeben.

Aus den Werten für $v_{\text{mtl.}\%}$ und $k\,n_{\text{st}}$ erhält man endlich folgende mittlere Fahrgeschwindigkeiten:

$$v_{\text{mtl.}\%} = \sim 10 \quad \text{m/sk bei } n_{\text{st}} = 1230$$
$$v_{\text{mtl.}\%} = \sim 10{,}3 \quad \text{m/sk bei } n_{\text{st}} = 1060$$
$$v_{\text{mtl.}\%} = \sim 10{,}35 \quad \text{m/sk bei } n_{\text{st}} = 870$$
$$v_{\text{mtl.}\%} = \sim 9{,}8 \quad \text{m/sk bei } n_{\text{st}} = 750.$$

Mit Rücksicht auf möglichst kurze Fahrzeit (ohne Zeitrückhalt) würde man also einen Motor mit der Stundendrehzahl bei ~ 870 wählen, während in Bild 22, wo die Maxima der Grenzkurven bzw. ein bestimmter Anfahrstrom berücksichtigt waren, andere Werte für n_{st} günstiger waren. Nimmt man das effektive Zuggewicht pro Motor z. B. zu $G_M = 22$ t an, so erhält man aus Gleichung (16): $G_{M\%} = \dfrac{G_M}{M d_{\text{st}}}$ mit $G_{M\%} = 0{,}28$ das Stundenmomemt $M d_{\text{st}}$ zu ~ 79 mkg.

Um den Wattstundenverbrauch pro tkm zu bestimmen, berechnet man zunächst den Ausdruck $\dfrac{0{,}143 \cdot M d_{\text{st}}}{\eta_M \cdot G_M \cdot k}$ in Gleichung (28); mit $\eta_M = 0{,}9$ erhält man dafür die Größe ~ 57. Da für den Motor mit $n_{\text{st}} = 870$ für $V_\%$ der Wert $\sim 0{,}72$ gefunden war, ist Wst/tkm $= 0{,}72 \cdot 57 \cong 41$.

Hinsichtlich des Wattstundenverbrauches z. B. würde im vorliegenden Falle ein Motor mit höherer Stundendrehzahl günstiger sein, da er ein kleineres $V_\%$ zur Folge hat, doch würde man kein gleichwertiges Fahrdiagramm erhalten, da der Auslauffaktor φ einen anderen Wert hat (vgl. S. 189 Fußnote).

Stellt man die gleiche Untersuchung für gebrochene Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe an, so sieht man aus Bild 8, daß die verlangte Räumungsbeschleunigung von 0,5 m/sk² nur für den Prozenträumungsweg $S_{R\%} = 1{,}05$ ($S_\% = 7{,}5$) mit $J_{M\%}$ auf Reihe gleich etwa 2,2 erreicht wird, da nach Voraussetzung die maximale Anfahrbeschleunigung nicht größer als 0,8 m/sk² sein soll, der Anfahrstrom pro Motor $J_{M\%}$ auf Reihe daher nicht weiter gesteigert werden darf. (Aus Bild 10 dagegen geht hervor, daß bei gebrochener Anfahrt mit Auslauf auf Reihe die verlangte Räumungsbeschleunigung noch bis $S_{R\%} \sim 1{,}8$ erreicht wird). Für gebrochene Anfahrt ohne Auslauf auf Reihe käme im vorliegenden Fall daher nur ein Motor mit einer Stundendrehzahl von ~ 1230 oder höher in Frage[1]). Aus Bild 16 ergibt sich bei $J_{M\%}$ auf Reihe $= 2{,}2$ für $S_\% = 7{,}5$ ein $v_{\text{mtl.}\%}$ (ohne Zeitrückhalt) von $\sim 0{,}82$ und aus Bild 19 ein $V_\%$ von $\sim 0{,}76$. Die effektive mittlere Fahrgeschwindigkeit wäre daher $0{,}82 \cdot 0{,}01 \cdot 1230 \cong 10{,}1$ m/sk, während Wst/tkm $= 0{,}76 \cdot 57 \cong 43$ ist; beide Werte unterscheiden sich nur wenig von denen, die der bei geradliniger Anfahrt angenommene Motor erreicht, doch sind sie beide ungünstiger.

Es erscheint wichtig, hier nochmals darauf hinzuweisen, daß in den bisherigen Anwendungsbeispielen die Zugkraftkonstante $K = 10$, das Prozentzuggewicht pro Motor $G_{M\%} = 0{,}28$ und der Fahrwiderstand w in kg/t $= 3{,}5$ gesetzt waren. Es sind daher jetzt Untersuchungen darüber anzustellen, wie sich bei gleicher Stationsentfernung die Verhältnisse bezüglich Fahrzeit, Räumungszeit und Wattstundenverbrauch ändern, wenn man für K, $G_{M\%}$ und w beliebige andere Werte einsetzt. Dazu

[1]) Dieser im Vergleich zur geradlinigen Anfahrt ($n_{\text{st}} = \sim 870$) um ~ 40 % größeren Stundendrehzahl entspricht auch eine um den gleichen Prozentsatz höhere Stundenleistung. Man wird daher im vorliegenden Fall der geradlinigen Anfahrt den Vorzug geben, wenn der dabei um etwa 45 % größere maximale Anfahrstrom $J_{E\%}$ auf Parallel zulässig ist.

erscheinen die mit Prozentbeschleunigungen $p_{\%}$ gewonnenen Kurven geeignet, die man aus den bereits besprochenen Abbildungen erhält, wenn man die in ihnen dargestellten Prozentzeiten und Prozentwege mit $\psi = \frac{K}{\varrho \cdot G_{M\%}} = \frac{10}{107{,}65 \cdot 0{,}28} = 0{,}332$ multipliziert, die Beschleunigungen dagegen durch ψ dividiert (vgl. S. 195).

Von den zahllosen Varianten beliebiger Änderung der Größen K, $G_{M\%}$ und w sollen hier nur die folgenden Fälle besprochen werden:

1. $K = 8$; $k = 0{,}0125$; $G_{M\%} = 0{,}28$; $w = 3{,}5$
2. $K = 8$; $k = 0{,}0125$; $G_{M\%} = 0{,}224$; $w = 3{,}5$
3. $K = 10$; $k = 0{,}01$; $G_{M\%} = 0{,}224$; $w = 3{,}5$

$G_{M\%}$ zu 80 % (Gewicht des Leerzuges) angenommen.

Für das Prozentmoment $(Md_{\%})_{p=0}$ in Gleichung (13), bei dem die Beschleunigung $p_{\%}$ zu Null wird, war früher der Wert 0,098 gefunden. Es ist einzusehen, daß sich dieser Wert bei konstantem w und einer Änderung von ψ ebenfalls verändern muß, wenn die Beziehung $p = \psi \cdot p_{\%}$ gültig bleiben soll [vgl. hierzu die Gleichungen (9—14)]. Um daher die bei Verwendung von Prozentbeschleunigungen gefundenen Kurven für beliebige Werte von ψ benutzen zu können, sind die ganzen Berechnungen für mehrere angenommene Werte für $(Md_{\%})_{p=0}$ durchzuführen und dann die jeweils gültigen Kurven zu verwenden. Es soll hier nicht untersucht werden, wieviel und welche Werte dies am zweckmäßigsten sind, man sieht aber, daß das Rechnen mit Prozentbeschleunigungen immer noch einfacher ist als das zuerst verwendete Verfahren mit effektiven Beschleunigungen, bei dem man ja die verschiedensten Änderungen mehrerer Größen (K, $G_{M\%}$, w) statt nur einer [$(Md_{\%})_{p=0}$] hätte in den Kreis der Betrachtungen ziehen müssen. Wie man sich durch Kontrollberechnungen überzeugen kann, sind die Ergebnisse mit zwei nicht allzustark voneinander abweichenden Werten für $(Md_{\%})_{p=0}$ u. U. nur wenig voneinander verschieden, so daß man bei Überschlagsberechnungen eine passend gewählte Größe ohne große Bedenken beibehalten kann.

Für die oben genannten Änderungen der Konstanten K und $G_{M\%}$ erhält man ψ zu 0,266 bei 1., 0,332 bei 2. und 0,415 bei 3. Der Einfachheit wegen soll für $(Md_{\%})_{p=0}$ der Wert 0,098 beibehalten werden. Wie groß wird nun die mittlere Fahrgeschwindigkeit für einen bestimmten Haltestellenabstand und welche Stundendrehzahl muß der Motor haben? Aus der allgemeinen Gleichung (21a) für den effektiven Weg S erhält man $n_{st} = \sqrt{\frac{\psi \cdot S}{k^2 \cdot S'_{\%}}}$, während sich für die mittlere Fahrgeschwindigkeit wie früher $v_{mtl.} = v_{mtl.\%} \cdot k \cdot n_{st}$ ergibt. Die Gleichung für n_{st} soll für die folgenden Betrachtungen umgeformt werden in: $n_{st} = \frac{1}{k} \sqrt{\frac{\psi}{S'_{\%}}} \sqrt{S}$. Die erforderliche Stundendrehzahl wird sich also mit der Wurzel aus der effektiven Stationsentfernung S ändern; außerdem ist sie proportional der Wurzel aus $\psi = \frac{K \cdot Md_{st}}{\varrho \cdot G_M} = \frac{K}{\varrho \cdot G_{M\%}}$, umgekehrt proportional der Wurzel aus der mit Prozent-Beschleunigungen berechneten Prozent-Stationsentfernung $S'_{\%}$ und umgekehrt proportional dem Geschwindigkeitsfaktor k. Setzt man den eben gefundenen Ausdruck für n_{st} in die Gleichung für die mittlere Fahrgeschwindigkeit ein, so erhält man: $v_{mtl.} = v_{mtl.\%} \cdot \sqrt{\frac{\psi}{S'_{\%}}} \cdot \sqrt{S}$. Von der Größe von $v_{mtl.\%}$ abgesehen, ist also die effektive mittlere Fahrgeschwindigkeit propor-

tional der Wurzel aus der effektiven Stationsentfernung S, der Wurzel aus ψ und umgekehrt proportional der Wurzel aus der Prozent-Stationsentfernung $S'_{\%}$. Zwischen $v_{\text{mtl.}\%}$ und $S'_{\%}$ ist ein Zusammenhang durch die Geschwindigkeitsgrenzkurven (vgl. Bild 16, 20 und 21) gegeben; ob diese Zeitrückhalt enthalten oder nicht, ist zunächst belanglos. Es ist vorerst auch gleichgültig, wie groß $v_{\text{mtl.}\%}$ bei bestimmtem $S'_{\%}$ und wie groß die Stationsentfernung S ist, allgemein kann man bei Beibehaltung bestimmter Werte für diese Größen feststellen:

1. Für konstantes ψ ist auch die effektive mittlere Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}}$ konstant, doch wächst die erforderliche Stundendrehzahl n_{st} umgekehrt proportional zu k bzw. direkt proportional zu K.

2. Für konstantes K bzw. k aber variables ψ sind Stundendrehzahl n_{st} und mittlere Fahrgeschwindigkeit $v_{\text{mtl.}}$ proportional $\sqrt{\psi}$.

Um einen Anhalt zu geben, seien folgende Zahlen genannt: Die Prozentwege $S'_{\%}$ sind gleich $\psi \cdot S_{\%}$; es entsprechen sich also 20 und 6,64, 15 und 4,98, 10 und 3,32 sowie 7,5 und 2,49, wenn für ψ der früher ermittelte Wert 0,332 (vgl. S. 195) eingesetzt wird. Nimmt man nun z. B. den Maximalwert der $v_{\text{mtl.}\%}$-Kurve für $S'_{\%} = 3{,}32$ ($S_{\%} = 10$, Bild 16), der für geradlinige Anfahrt gleich 1,0 ist, so erhält man:

1. $K = 8$; $k = 0{,}0125$; $G_{M\%} = 0{,}28$; $\psi \cong 0{,}266$; $\sqrt{\frac{\psi}{S'_{\%}}} \cong 0{,}283$; $\frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{\psi}{S'_{\%}}} \cong 22{,}6$;

für $S = 730$ m ($\sqrt{S} \cong 27$) erhält man dann n_{st} zu $22{,}6 \cdot 27 \cong 610$ Umdr./min und $v_{\text{mtl.}}$ zu $1{,}0 \cdot 0{,}283 \cdot 27 \cong 7{,}65$ m/sk.

2. $K = 8$; $k = 0{,}0125$; $G_{M\%} = 0{,}224$; $\psi \cong 0{,}332$; $\sqrt{\frac{\psi}{S'_{\%}}} \cong 0{,}316$;

$\frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{\psi}{S'_{\%}}} \cong 25{,}3$. Für $S = 730$ ergibt sich n_{st} zu $25{,}3 \cdot 27 \cong 680$ und $v_{\text{mtl.}}$ zu $1{,}0 \cdot 0{,}316 \cdot 27 \cong 8{,}5$ m/sk.

3. $K = 10$; $k = 0{,}01$; $G_{M\%} = 0{,}224$; $\psi \cong 0{,}415$; $\sqrt{\frac{\psi}{S'_{\%}}} \cong 0{,}354$; $\frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{\psi}{S'_{\%}}} \cong 35{,}4$

Für $S = 730$ erhält man n_{st} zu $35{,}4 \cdot 27 \cong 950$ und $v_{\text{mtl.}} = 1{,}0 \cdot 0{,}354 \cdot 27 \cong 9{,}5$ m/sk.

Der Wattstundenverbrauch pro tkm ist nach wie vor $= V_{\%} \frac{0{,}143 \cdot Md_{\text{st}}}{\eta_M \cdot G_M \cdot k}$.

Zum Schluß mögen die wichtigsten Bezeichnungen nochmals zusammengefaßt werden.

Verzeichnis der wichtigsten Bezeichnungen.

Index $_{\%}$ der betreffende Wert ist ein „Prozentwert".
„ $_{\text{st}}$ der betreffende Wert ist ein „Stundenwert", kennzeichnet also die Stundenleistung.
E Fahrspannung.
J Strom, J_M Strom pro Motor, J_E Strom pro Einheit (2 Motoren).
v Geschwindigkeit in m/sk.
t Zeit in Sekunden, T Fahrzeit in Sekunden für eine bestimmte Stationsentfernung, τ Stromgabezeit, t_a Auslaufzeit, t_b Bremszeit.
s Weg in Metern, S Stationsentfernung in Metern, S_R Räumungsweg in Metern.
(Jt) Amperesekunden.
(J^2t) Ampere-Quadrat-Sekunden.
p Beschleunigung in m/sk², p_w Wegbeschleunigung, Räumungsbeschleunigung.
Z Zugkraft je Motor in Kilogramm.
Md Drehmoment je Motor in mkg; $(Md)_{p=0}$ Drehmoment, bei dem die Beschleunigung p zu Null wird.
G_M Zuggewicht je Motor in t.
w Fahrwiderstand in kg/t, W Fahrwiderstand eines Zuges in kg.
M Masse eines Zuges in kg : m/sk², M_M Masse (eines Zuges) je Motor.

K Zugkraftkonstante, enthält Übersetzungsverhältnis $\ddot{u}$, Raddurchmesser D und Getriebewirkungsgrad η_z; $K = \frac{2 \cdot \ddot{u} \cdot \eta_z}{D}$.

k Geschwindigkeitskonstante, enthält $\ddot{u}$ und D; $k = \frac{D \cdot \pi}{60 \cdot \ddot{u}}$.

ϱ Massenfaktor, zur Umrechnung des Zuggewichtes in Masse, unter Berücksichtigung der rotierenden Massen.

φ Auslauffaktor, ein Maß für die Zeitdauer t_a des Auslaufes ohne Strom.

ψ Beschleunigungsfaktor, zur Umrechnung der Prozentbeschleunigung in effektive Beschleunigung.

B Motorbeanspruchung $= \sqrt{\frac{\Sigma \Delta (J^2 t)_{0/0}}{T_{0/0}}}$.

$V_{0/0}$ Wattstundenfaktor $= \frac{\Sigma \Delta (Jt)_{0/0}}{S_{0/0}}$.

L Leistung in kW.

n Umdrehungen pro Minute.

Zusammenfassung.

Als Ergebnis der mit sog. Prozentwerten und unter Einführung eines Grenzwertes für die Motorbeanspruchung durchgeführten Berechnungen von Fahrschaulinien ist folgendes festgestellt worden:

1. Für jede Prozent-Stationsentfernung ist das Maximum der mittleren Prozentfahrgeschwindigkeit an eine bestimmte Anfahrbeschleunigung gebunden.

2. Diese Anfahrbeschleunigung sowohl wie die dabei erreichte mittlere Prozentfahrgeschwindigkeit steigen mit wachsender Prozent-Stationsentfernung.

3. Bei kleinen Prozent-Stationsentfernungen hat eine weitere Steigerung der Anfahrbeschleunigung ein Abnehmen der mittleren Prozentfahrgeschwindigkeit zur Folge. (Bei großen Prozent-Stationsentfernungen wird dieser Fall erst eintreten, wenn man die Anfahrbeschleunigung auf Werte steigert, die unter Umständen nicht mehr als zulässig gelten dürfen.)

4. Zeitrückhalt setzt im allgemeinen die erreichbare mittlere Prozentfahrgeschwindigkeit herab (auch wenn man für seine Ausnutzung eine höhere Motorbeanspruchung zuläßt als normal) und bedingt eine größere Anfahrbeschleunigung, wenn wieder ein Maximum an mittlerer Prozentfahrgeschwindigkeit erreicht werden soll.

5. Bei kleinen Prozent-Stationsentfernungen sind große mittlere Prozentfahrgeschwindigkeit und große Anfahrbeschleunigung (Räumungsbeschleunigung) unvereinbar; letztere würde außerdem verhältnismäßig große Auslaufzeiten bedingen.

6. Geradlinige und gebrochene Anfahrt können bei geeigneter Wahl der Anfahrbeschleunigung gleich große maximale mittlere Prozentfahrgeschwindigkeit ergeben, wobei die gebrochene Anfahrt kleineren Anfahrspitzenstrom und unter Umständen auch kleineren Wattstundenfaktor bedingt; die betreffenden Fahrdiagramme werden jedoch nicht immer gleichwertig sein.

7. Feldschwächung sowie (bei gebrochener Anfahrt) der Auslauf auf Reihe können in bestimmten Fällen zu größeren Werten für die mittlere Prozentfahrgeschwindigkeit, teilweise sogar bei kleinerem Wattstundenfaktor, führen; auch hier werden sich nicht immer gleichwertige Fahrdiagramme ergeben.

8. Die Räumungsbeschleunigung wächst durch Erhöhung des Anfahrstromes, bei abnehmendem Prozenträumungsweg, durch Anwendung der Feldschwächung und endlich bei der gebrochenen Anfahrt durch Einfügung eines Auslaufes auf Reihe. Bei gleichem Anfahrstrom pro Einheit auf Reihe hat die geradlinige Anfahrt größere Räumungsbeschleunigung, bei gleichem Anfahrstrom pro Einheit auf Parallel die

gebrochene Anfahrt. Gleiche Räumungsbeschleunigung bei beiden Anfahrarten bedingt kleineren Anfahrspitzenstrom für die gebrochene Anfahrt.

Die Umrechnung der Prozentwerte in effektive Werte geschieht mit Hilfe von Umrechnungsformeln, die außer konstanten Größen nur die Stundenleistungsdaten des ausgewählten Motors enthalten. Für konstante effektive Stationsentfernungen stehen Stundendrehzahl des Motors und Prozentstationsentfernung im umgekehrten Verhältnis. Schlußfolgerungen über den Einfluß der Stundendrehzahl auf Räumungszeit und Fahrzeit können daher leicht aus den genannten Feststellungen gezogen werden[1]).

Es wird ferner ein Verfahren angegeben, das unter dem geringsten Aufwand an Rechenarbeit die Verwendung beliebiger Werte für Zugkraftkonstante, Fahrwiderstand und Prozentzuggewicht pro Motor gestattet.

Die Anwendung der Ergebnisse auf dem praktischen Betrieb entsprechende Beispiele zeigt, daß die Berechnung von Prozentfahrschaulinien eine leichte Übersicht über die im Stadtschnellbahnbetrieb interessierenden Fragen bieten kann.

Benutzte Literatur.

1. E. E. Seefehlner: Elektrische Zugförderung.
2. W. Bethge: Die kürzeste Zugfolge für städtische Schnellbahnen unter besonderer Berücksichtigung der Zuglänge. EKB 1913, H. 11.
3. W. Bethge: Feldschwächung der Motoren bei Gleichstrombahnen. EKB 1918, H. 9.
4. W. Bethge: Der Zeitrückhalt bei städtischen Schnell- und Straßenbahnen, seine Bedeutung für den Betrieb sowie für den Stromverbrauch usw. EKB 1918, H. 5.
5. W. Bethge: Der Stromverbrauch bei städtischen Schnellbahnen. EKB 1917, H. 20.
6. W. Bethge: Der Zeitrückhalt im Schnellbahnbetrieb. ETZ 1927, S. 1905.
7. O. Christiansen: Die theoretische Bedeutung der Anfahrbeschleunigung für die Leistungsfähigkeit einer Stadtschnellbahn. Glas. Ann. 1919.
8. Ph. Pforr: Berechnung von Zugbewegungen; Verlag Oldenbourg.
9. K. Sveinsson: Umrechnung der Kennlinien eines Haupstrommotors vom Regelfeld auf geschwächtes Feld. EKB 1918. H. 12.
10. E. Volkers: Berechnung des Wattstundenverbrauches elektrischer Bahnen. ETZ 1901, H. 24.
11. H. Osborne: Beitrag zur Ermittlung von Aussetzleistungen. ETZ 1922. H. 20.
12. F. Éliás: Beitrag zur Vorausberechnung der Erwärmungskurven von Triebmotoren el. Fahrzeuge. El. Bahnen, Juli 1927. — Eine Methode zur genauen Ermittlung der Endtemperaturen und der Wärmeübergangszahlen von Bahnmotoren. Zentralblatt für den el. Zugbetrieb, März 1928.

Wegen weiterer Literatur sei auf das Literaturverzeichnis in E. E. Seefehlner: Elektrische Zugbeförderung (S. 129/130) hingewiesen.

[1]) Es mag hier auf den Aufsatz des Verfassers (der Einfluß der Stundendrehzahl eines Motors auf Räumungszeit und Fahrzeit bei Stadtschnellbahnen) verwiesen sein, der im Zentralblatt für den el. Zugbetrieb September 1928 erscheint.

Kurzer Lebenslauf.

Ich bin am 17. 5. 1899 zu Hessen in Braunschweig als Sohn eines Fabrikbesitzers geboren und habe im Juni 1917 am Wilhelm-Gymnasium zu Braunschweig meine Reifeprüfung bestanden. Nach Beendigung des Krieges studierte ich bis zum Vorexamen an der Technischen Hochschule zu Hannover und legte meine Hauptprüfung im Mai 1922 an der Technischen Hochschule zu Breslau ab. Seit Mai 1922 bin ich bei den Siemens-Schuckert-Werken A.-G., Berlin-Siemensstadt, angestellt.